EL HELIOCENTRISMO

COPÉRNICO

A vueltas con la Tierra



NATIONAL GEOGRAPHIC

NICOLÁS COPÉRNICO nunca previó que su apellido acabaría por asociarse con la mayor revolución científica de la era moderna. Nacido y educado en la pujante Polonia del siglo XV, fue siempre un hombre discreto y profundamente religioso que, a diferencia de muchos de sus herederos intelectuales, nunca fue perseguido por sus ideas. Y eran ideas peligrosas: al postular un universo con el Sol firmemente instalado en su centro, se sacudía el yugo milenario de Ptolomeo, por un lado, y ponía en duda la exactitud de la Biblia en lo relativo a la astronomía, por el otro. Al atreverse a pensar más allá de la tradición y el dogma religioso, este tranquilo astrónomo polaco nos legó no solo una nueva visión del universo sino también una prueba irrefutable del poder y el alcance del pensamiento libre.

EL HELIOCENTRISMO

COPÉRNICO

A vueltas con la Tierra

NATIONAL GEOGRAPHIC

JOSÉ LUIS HUERTAS DÍAZ es catedrático de Electrónica de la Universidad de Sevilla. Es autor de numerosos trabajos científicos en su área de conocimiento y ha desarrollado su carrera profesional en el mundo de la investigación en el ámbito del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Alaexis: 45ad; Archivo del Gobierno de Polonia: 119b; Archivo RBA: 19b, 31ai, 32, 41, 45ai, 49ai, 51; 57b, 66, 71b, 72, 74d, 75, 78, 84, 87i, 94, 102, 105, 111ad, 117, 119a, 124, 125, 137, 141, 142, 145, 147; Biblioteca Jaguellónica, Cracovia: 111b; Cancre: 27; Colección Mario Taddei: 31b; Corbis: 45b; Galleria dell'Accademia, Venecia: 20; Lestat (Jan Mehlich): 49ad; Maksim: 31ad; Museo Diocesano Tridentino: 139; Museo Nacional de Antropología e Historia, Ciudad de México: 23; National Portrait Gallery, Londres: 103; P&P: 19ai; Saiko: 57ai; Stephen McCluskey: 19ad; Universidad de Bolonia: 57ad; Universidad de Chicago: 87d; Universidad Jagellónica, Cracovia: 26; Universidad Nicolás Copérnico: 71a, 111ai, 113.

ISBN: 978-84-473-7639-1
Depósito legal: B-4510-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

Nicolás Copérnico nació en Polonia, en el último tercio del siglo xv. Un lugar y una época en plena efervescencia social, política, religiosa y científica. Era la Polonia que había conseguido afirmarse como nación tras siglos de pelea con sus vecinos; una nación en la que el catolicismo y el papado habían tenido un arraigo importante y habían significado una garantía frente a las amenazas de los países circundantes. Una Polonia que había creado en su capital, Cracovia, una institución docente superior solo comparable a las mejores universidades francesas, inglesas, italianas o españolas. Una Polonia que vivía inmersa en un proceso revolucionario cuyo campo de batalla era toda Europa. Creencias, conocimientos e ideas estaban sufriendo una transformación que concluiría con un cambio radical en la visión que el hombre había tenido de su entorno y de sí mismo. En pocos años se iban a sustituir algunos paradigmas considerados hasta entonces inamovibles en la cultura europea. En lo artístico se estaba viviendo la transición desde el oscurantismo y las convenciones de la Edad Media hasta la luminosidad del Renacimiento. En lo político, *El Príncipe* de Maquiavelo marcaría un antes y un después en las relaciones del gobernante con sus súbditos. En lo social, el individuo iba a demandar un protagonismo que nunca antes había tenido. En lo científico, Leonardo planteó la necesidad de abordar el estudio fiel de la realidad para que los fenómenos naturales fueran adecuadamente descritos y medidos.

Contemporáneos de Copérnico fueron Maquiavelo, Tiziano, Miguel Ángel, Leonardo, Rafael, Miguel Servet, Vesalio, Cardano, Colón, Vasco de Gama, Magallanes, Bartolomé de las Casas, Lutero, Calvino, Erasmo, Tomás Moro, Ignacio de Loyola y Paracelso, por citar solo algunos de los protagonistas de todo ese terremoto que afectó al pensamiento occidental, modificándolo de manera irreversible.

Sin embargo, Copérnico vivió apartado de los focos de la popularidad. A primera vista, su biografía parece anodina, la de un hombre de iglesia que, tras un período de formación universitaria, se enclaustró en la pequeña diócesis de Warmia, en la Prusia Oriental, al norte de su país, y se dedicó a llevar a cabo con pulcritud las tareas administrativas que la jerarquía le encomendó. Su vida transcurrió en la sombra y a la sombra de su tío materno, obispo y príncipe, que se hizo cargo de su educación a la muerte de su padre. Sobre Copérnico hay pocas noticias detalladas más allá de las que se refieren a su amplia labor como gestor eclesiástico; sus datos biográficos corresponden más a un administrador que a un clérigo y, desde luego, parecen ajenos a lo que se esperaría de alguien comprometido con una obra científica de tanto alcance.

El joven Nicolás se sumergió en el ambiente inquieto y creativo que se respiraba en Cracovia, adonde se trasladó para seguir estudios superiores. La sólida formación que allí adquirió se vería complementada con largos estudios en Italia. Pero, hombre del Renacimiento al fin, estos estudios fueron muy diversos: medicina, leyes, astronomía, matemáticas e incluso astrología. Probablemente su paso por la Universidad de Cracovia, en ese momento llamada Academia de Cracovia, fue decisivo para despertar en él su fervoroso interés por la cosmología. Allí trabó conocimiento con estudiosos de gran renombre, alcanzó un alto nivel de formación en matemáticas y astronomía, y aprendió también a desarrollar una actitud idónea para enfrentarse a los problemas científicos que fue clave para su trabajo futuro. Sus dudas respecto al modelo imperante para representar nuestro universo cercano debieron de nacer en aquellas aulas. A partir de ahí fue cristalizando la solución al problema que le preocuparía durante toda su vida: explicar los movimientos planetarios y encontrar un modelo nuevo que diera cuenta

satisfactoriamente de las anomalías que afectaban al anterior modelo ptolemaico, en el que la Tierra ocupaba el centro del universo.

Esta concepción geocéntrica del universo hay que atribuirla a Platón, aunque fue Aristóteles quien la consolidó y Eudoxo quien la dotó de un soporte matemático. El modelo platónico se puede resumir en la existencia de una enorme esfera que rodea a nuestro planeta y forma lo que se ha dado en llamar «el cielo». Esa esfera rota diariamente y, de manera independiente, da también una vuelta de período anual. Como explicación de la realidad, tiene sin duda la ventaja de su simplicidad y de su concordancia aparente con lo que podemos apreciar a simple vista, sin otro aparato de medida que nuestros propios sentidos.

Ptolomeo, en el siglo II, encontró una brillante solución alternativa que permitía explicar con mayor precisión los movimientos observados. En su concepción introdujo un complejo modelo de esferas combinadas. Además postuló que, si bien todos los demás astros se movían en torno a nuestro planeta, su centro real era un punto externo a la Tierra. El Sol, la Luna y todos los planetas giraban sobre ese punto con velocidad uniforme y órbitas circulares. En realidad, el sistema ptolemaico no era *geocéntrico* como el de Aristóteles —la Tierra centro del universo—, sino *geostático* —la Tierra inmóvil y los planetas girando alrededor del ecuante—. Esta teoría no contradecía las ideas aristotélicas, sino que las complementaba como una especie de artificio geométrico que conciliaba la visión filosófica del universo con los datos experimentales.

Durante los trece siglos siguientes, los cálculos astronómicos fueron perfeccionándose y dieron lugar a contradicciones que se iban resolviendo a base de complicar cada vez más el modelo ptolemaico. Sin embargo, la constatación empírica de nuevos datos y la creciente complejidad que esas modificaciones añadían iban conduciendo a un callejón sin salida. La falta de precisión del sistema se traducía en inconsistencias significativas en sus predicciones. Por ejemplo, diferencias importantes entre el tiempo predicho y el real en los eclipses y, sobre todo, el atraso del calendario, lo que más tarde daría lugar a la reforma gregoriana de 1582.

Y aquí es donde intervino la mente abierta de Copérnico. Desplazó el centro hasta el Sol y enunció una concepción radicalmente

novedosa, sostenida por observaciones experimentales recogidas por astrónomos de épocas y lugares muy diversos. Copérnico se hizo la típica pregunta del científico que se atreve a desdeñar los caminos trillados: ¿Y si no fuera así? Y su respuesta fue genial. Partiendo de cero, olvidando las consideraciones filosóficas y teológicas que lastraban la verdad, reconsideró qué astro era el mejor candidato para ser el centro del sistema planetario y terminó concluyendo que era el Sol; y luego, basándose en las diferencias observadas entre las órbitas de Mercurio y Venus y las de los demás planetas, colocó a la Tierra en su posición correcta dentro de todo el conjunto, justificando que nuestro planeta se mueve sobre sí mismo.

Hoy día, los cambios que introdujo Copérnico pueden parecernos obvios. A nadie, salvo a algunos fundamentalistas de un color u otro, se le ocurre cuestionarse actualmente el modelo heliocéntrico. Lo que quizá no pensemos es que ese es su gran valor. Hasta el extremo de que esto nos lleva sin querer a considerarlo trivial, minusvalorando el cariz revolucionario que tuvo en su momento. Ha calado tanto en el imaginario colectivo que nos parece algo «natural», que no contradice en absoluto nuestra experiencia cotidiana. Sin embargo, eso distaba mucho de ser así en los albores del siglo XVI, cuando Copérnico se planteó la necesidad de cambiar los conceptos imperantes en la astronomía.

Copérnico rompió dos moldes. Uno, el de nuestra concepción del sistema solar. El otro, más sutil, el general de cómo abordar el conocimiento científico partiendo de combinar experimentación y reflexión, olvidando los preconceptos acientíficos que emanan de nuestra percepción o de ámbitos ajenos a la ciencia, como la religión o el mito. En ese sentido, revolucionó la ciencia y sus métodos de trabajo. Forzó lo que hoy conocemos como «cambio de paradigma», el abandono de una línea de pensamiento en favor de una orientación radicalmente rompedora. Sin él, la ciencia moderna habría tenido un desarrollo diferente.

La «revolución copernicana» debe entenderse, pues, a dos niveles. En lo concreto, como la sustitución de la concepción aristotélica y ptolemaica del universo por un nuevo modelo. En un sentido más general, significó la ruptura con una manera de concebir la realidad más influenciada por preconceptos que por la

inferencia a partir de los datos experimentales. Copérnico actuó valientemente contra lo establecido y se atrevió a postular una visión de la realidad física que otros habían intuido, pero que ninguno se había arriesgado a desarrollar.

Para comprender la magnitud y los inconvenientes de su trabajo, hay que entender el carácter del problema, que iba mucho más allá de lo meramente científico. En efecto, el modelo ptolemaico no era sino la vertiente científica de una concepción del mundo. Se trataba de una visión cosmológica enraizada incluso en los sistemas de creencias dominantes. La propia teología conectaba esta concepción a un universo en el que Dios tenía un papel central. El universo estaba formado por dos regiones, de composición y naturaleza diferentes: la Tierra y su entorno, formada por los cuatro elementos básicos y en la que el cambio era ley, y el Cielo, formado exclusivamente de éter y donde todo era perfección, inmutabilidad, la región de Dios. Hasta tal punto esto era así que, en la época en la que Copérnico estudiaba en Cracovia, se enseñaban dos sistemas distintos: los «naturalistas» explicaban el modelo de esferas homocéntricas de Aristóteles como algo «real»; en cambio, los «matemáticos» enseñaban el ptolemaico como un «método de cálculo», que no necesariamente se adecuaba a lo que ocurría pero que permitía predecir el curso de los planetas.

Copérnico publicó solo dos trabajos científicos a lo largo de su vida. El primero, manuscrito, anticipaba sus ideas heliocéntricas y suscitó un gran interés en medios científicos e incluso religiosos. La nueva visión del universo cercano estaba esbozada cuando su autor se acercaba a la edad de cuarenta años. Sin embargo, el desarrollo exhaustivo de sus teorías tuvo que esperar todavía otros treinta años para que las concluyera a su plena satisfacción y alcanzaran a ver la luz en su segundo trabajo. Cabe plantearse por qué tardó tanto en dar a conocer la redacción definitiva de su obra capital, que desarmó la visión ptolemaica del universo. Aunque no existen pruebas documentales directas, es de suponer que ese paréntesis se debió a dos cuestiones que permiten comprender el carácter y la personalidad de Copérnico. Por una parte, su minuciosidad en la contrastación de sus ideas con las medidas experimentales que, a partir del trabajo de otros y del suyo propio, tenía

a su disposición. La otra razón hay que buscarla probablemente en su fe y su prudencia. Consciente de dinamitar una visión del mundo soportada tanto por astrónomos clásicos, a los que admiraba y respetaba, como por su propia Iglesia, el hecho de cambiar tan radicalmente unos principios que se anclaban incluso en concepciones religiosas debió de tenerlo muy preocupado. Se trataba de conciliar, si era posible, lo que la razón le mostraba con la doctrina de Roma. Y en este punto nos es dado especular con que, conocedor de la dureza de los mecanismos de la Inquisición —exacerbada por la inquietud frente a la Reforma luterana—, Copérnico quisiera dar a sus argumentaciones la solidez y la rotundidad precisas para no enfrentarse a aquellos con las manos desnudas.

No andaba errado en lo que se refiere a los riesgos que corría. El desacuerdo entre ciencia moderna y creencias religiosas estaba servido. En cualquier caso, lo que sí parece seguro es que el sabio polaco era consciente de que su visión revolucionaría la ciencia. Quizá no hasta el punto en que de verdad lo hizo, ya que era difícil imaginar el piélago de consecuencias que el cambio de paradigma que propugnaba ha llegado a tener. Un modesto clérigo en un lugar apartado, periférico y fronterizo de Europa agitó los cimientos del conocimiento científico y abrió la puerta a la ciencia moderna.

Sobre las consecuencias de su obra científica en la evolución de la astronomía en particular y de la ciencia en general se ha escrito mucho. Baste con recordar que los trabajos de Galileo o de Kepler solo fueron posibles porque la teoría heliocéntrica había sido concebida, formulada y demostrada previamente. Su modelo, todavía vigente en lo esencial, sentó las bases para la moderna cosmología. Pero, sobre todo, Copérnico significó el primer gran triunfo de la verdad científica sobre las ideas preconcebidas. Representó la tenacidad del científico que, insatisfecho por la no concordancia entre los datos experimentales y las predicciones teóricas, es capaz de ir más allá incluso de sus creencias.

1473 Nace en Torún, cuarto hijo de Nicolás Copérnico y Barbara Watzenrode.

1483 Muere el padre; la familia queda bajo la protección del tío Lucas Watzenrode.

1491 Ingresa, junto con su hermano Andrés, en la Universidad de Cracovia.

1496 Viaja a Italia. Al año siguiente se matricula en la Universidad de Bolonia.

1503 Obtiene el doctorado en Derecho por la Universidad de Ferrara. A finales de año vuelve definitivamente a Polonia.

1507 Escribe su *Commentariolus*, que anticipa las ideas sobre su modelo.

1515 Comienza su trascendental obra *De revolutionibus orbium coelestium*.

1516 El papa León X pide ayuda para la reforma del calendario; se consulta un proyecto de Copérnico. Se instala en el castillo de Olsztyn, como administrador de los bienes del cabildo de Warmia.

1519 Traza un mapa del estuario del Vístula. Redacta su *Tractatus de monetis*, *Modus cudendi monetam*. Médico durante las epidemias que asuelan Polonia.

1522 Representa a Warmia en las asambleas de los Estados prusianos: propone usar su *De monetis* para fijar el cambio entre las monedas prusiana y polaca. Se adopta la tasa de cambio propuesta por él.

1525 Termina de redactar los tres primeros libros de su *De revolutionibus*.

1526 Ayuda a trazar un mapa de Polonia.

1533 Widmannstetter expone las teorías de Copérnico ante el papa Clemente VII.

1536 El cardenal Schönberg y el obispo Giese promueven la publicación del *De revolutionibus*.

1539 Lutero se declara contrario a la teoría heliocéntrica.

1540 Rheticus publica *Narratio prima*, exponiendo las teorías de su maestro.

1541 Wilhelm Gnapheus ridiculiza a Copérnico en la obra teatral *Morosophus (El sabio necio)*.

1542 La parte del *De revolutionibus* dedicada a la trigonometría es publicada en Wittenberg.

1543 A finales de marzo ve la luz la edición completa del *De revolutionibus*, con el añadido del *orbium coelestium* hecho por Osiander, que escribe el prólogo sin permiso. Muere el 24 de mayo.

CAPÍTULO 1

Primeros años: las ideas clásicas

La transición entre la Edad Media y el Renacimiento fue, para Europa, una época de crisis de la que supo salir transformada. Para la ciencia, significó el rescate de la tradición griega y latina, así como su posterior superación; pero también la asimilación de conocimientos llegados de otros marcos culturales, fundamentalmente el árabe. La geografía, con la navegación a través de los océanos, y la astronomía, con la observación del cielo y mediciones cada vez más precisas, vieron el mayor cambio de su existencia.

Nicolás Copérnico nació en Torún, ciudad situada en el norte de Polonia, el 19 de febrero de 1473, en el seno de una familia acomodada y con gran influencia en la política local. Era el cuarto de cuatro hermanos, dos mujeres y dos varones, hijos de un comerciante originario de Cracovia y afincado en Torún, adonde había llegado en 1454. El padre de Nicolás entabló allí relación con la familia Watzenrode; y con una hija de esa familia de ricos comerciantes, Barbara, se casó en 1460.

La ascendencia familiar de los Copérnico parece estar asentada en la región de Silesia, concretamente en la aldea de Koperniki, donde seguramente hay que buscar el origen del apellido. Aunque la actividad familiar era el comercio, el abuelo de Nicolás, Juan Copérnico, fue un astrónomo que alcanzó cierta reputación en los círculos científicos de su país.

El motivo de que el padre de Nicolás se estableciera en Torún fue seguramente por la importancia comercial de esa ciudad, situada a orillas del Vístula. Torún tenía un puerto pujante, al que llegaban navíos que la conectaban por mar con Brujas, Bergen, Lübeck o Londres, y en ella se hacían lucrativos intercambios con los barcos fluviales que venían de Hungría, Bohemia o el sur de Polonia. La ciudad se había distinguido por su enorme contribución económica a la guerra contra los caballeros teutónicos, opresores alemanes de esos territorios del norte de la emergente Polonia.

Con todo, quien tuvo mayor peso en la formación y el destino del astrónomo fue su familia materna, los Watzenrode. Su abuelo materno, Lucas Watzenrode, actuó como delegado de la ciudad de Torún en el congreso celebrado en la ciudad de Grudziadz en el año 1453 por la Asociación Prusiana, una confederación de ciudades del norte de lo que hoy es Polonia. Estas ciudades, como todos los territorios de Prusia y Pomerania, estaban entonces sometidas a la Orden Teutónica, que contaba con el apoyo del emperador y del papado. Un año más tarde se iniciaron las hostilidades abiertas contra la Orden, al enviar la ciudad de Torún un documento que cancelaba los vínculos entre ambos. El castillo que los caballeros teutónicos habían construido en Torún fue asaltado y destruido, y una delegación de la ciudad se entrevistó con el rey de Polonia para pedir su ayuda.

La respuesta del rey polaco fue inmediata, invadiendo los territorios bajo dominio teutón. La guerra se prolongaría durante trece años y, aunque formalmente acabó con la incorporación en vasallaje de Chelmno, Pomerania y Prusia a Polonia, aún se siguieron dando episodios de enfrentamientos violentos durante las décadas siguientes. El abuelo de Copérnico, Lucas, nombrado concejal mayor de la ciudad, su tío Tiedemann von Allen y el propio padre del astrónomo tuvieron una destacada participación en la guerra contra la Orden, contribuyendo con grandes sumas de dinero y desempeñando un importante papel en la resistencia.

EL TÍO LUCAS

No obstante, fue uno de los hijos de su abuelo, también de nombre Lucas, la persona que tendría un papel decisivo en la vida del joven Nicolás. Muerto su padre en 1483, el patrimonio familiar se resintió pronto y fue Lucas Watzenrode, el hermano de su madre, quien se quedó a cargo de ella y de sus cuatro hijos. Este hombre, doctor en Derecho, de vasta cultura y con indudables cualidades políticas, desarrolló una carrera brillante en el seno de la Iglesia polaca. Pero, en lo que nos concierne, al tomar la responsabilidad



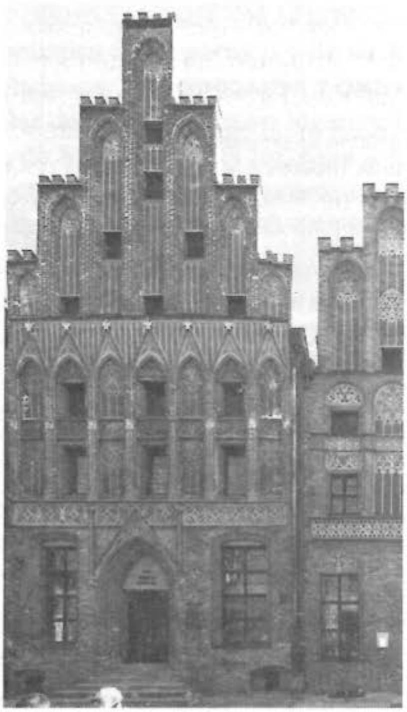


FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Monumento a Nicolás Copérnico en Varsovia, con una esfera armilar en una mano.

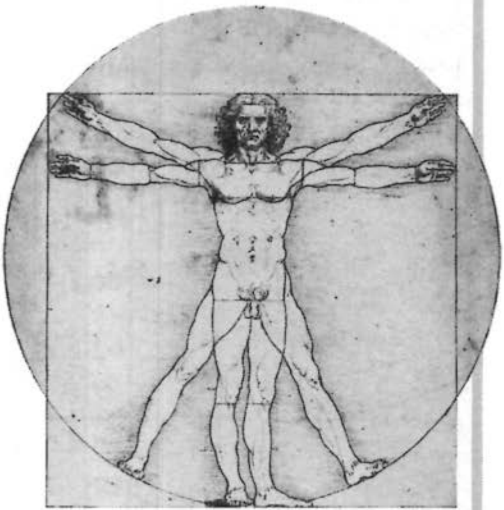
FOTO SUPERIOR DERECHA:
El Museo de Nicolás Copérnico en Torún (Polonia) ocupa hoy dos preciosas casas góticas, una de las cuales es su casa natal. Allí nació el futuro astrónomo el 19 de febrero de 1473.



FOTO INFERIOR:
Mapa antiguo de la ciudad de Torún (Thorn en alemán), en época de Copérnico. Torún, en el norte de Polonia, junto al Vístula, tenía entonces una gran importancia comercial, debido sobre todo a su activo puerto.

HUMANISMO Y RENACIMIENTO

El Humanismo es un movimiento intelectual, filosófico y cultural que nació en la Italia del siglo XIV. Fue un fenómeno fundamentalmente ideológico, aunque impregnó todos los ámbitos del conocimiento y el arte, estableciéndose como contraposición a las concepciones imperantes en la época medieval. El Humanismo propugnaba una formación integral del hombre en todas sus facetas, fundada en las fuentes clásicas grecolatinas, muchas de ellas perdidas durante largo tiempo y recuperadas entonces en los monasterios de todo el continente o a través de sus traducciones que habían llevado a cabo los musulmanes. Gracias al Humanismo progresó un ideal individualista de la cultura y se generó un profundo interés por los autores clásicos. Personajes destacados de este movimiento humanista fueron, por ejemplo, Dante Alighieri, Francesco Petrarca, Giovanni Boccaccio, Marsilio Ficino, Antonio de Nebrija, Picco della Mirandola, Erasmo de Rotterdam, Guillaume Budé, Tomás Moro, Juan Luis Vives o Michel de Montaigne, entre otros muchos. En buena medida, el movimiento humanista formó la vanguardia del Renacimiento, esa amplia transformación cultural que modificó de manera rotunda las artes y las ciencias en la Europa de los siglos XV y XVI. En realidad fue la difusión de las ideas humanistas lo que desencadenó la nueva concepción del hombre y del mundo que se originó durante el período renacentista. El Renacimiento significó una nueva forma de interpretar el mundo y de considerar el papel del hombre, sustituyendo el teocentrismo medieval por un relativo antropocentrismo. Preconizaba, en el fondo, una conciencia nueva de lo individual que marcaría las concepciones ideológicas del filósofo, la actitud espiritual del artista y el enfoque metodológico del hombre de ciencia.



En su famoso dibujo *El hombre de Vitrubio*, Leonardo muestra al hombre, inscrito dentro de un círculo y un cuadrado, como centro del nuevo universo cultural surgido en el Humanismo y desarrollado en el Renacimiento.

de orientar la formación de sus cuatro sobrinos, fue el principal tutor de las inclinaciones intelectuales de Copérnico y de su futura dedicación a los asuntos religiosos.

La primera formación escolar de Copérnico tuvo lugar en la escuela parroquial de la iglesia de San Juan, muy próxima a su hogar y de la que había sido director su tío Lucas. Esta institución debió de tener un alto nivel educativo, dadas las personas que impartían clase allí, formadas en prestigiosas universidades extranjeras. De la mano de estos profesores llegaron los nuevos aires del Humanismo imperante en Europa hasta los jóvenes del lugar, entre los que se contaba el menor de los Copérnico. Aparte de su tío, por este colegio había pasado Konrad Gesselen (1409-1469), un conocido humanista muy versado en astronomía. Probablemente alguno de sus discípulos pudo ser responsable de haber despertado en el inquieto Nicolás el primer interés en dicha ciencia.

> «Bien sé que soy mortal, una criatura de un día. Pero si mi mente observa los serpenteantes caminos de las estrellas, entonces mis pies ya no pisan la tierra, sino que al lado de Zeus mismo me lleno con ambrosía, el divino manjar.»
>
> — Epigrama del *Almagesto* de Claudio Ptolomeo.

No hay datos precisos sobre dónde continuó su formación tras la muerte de su padre; lo que parece más probable es que la madre siguiera residiendo en Torún y Nicolás se desplazara a Chelmno a fin de ingresar en su escuela municipal —que había sido creada en 1473—, en la que un grupo de monjes educadores venidos desde Flandes, los Hermanos de la Vida Comunitaria, impartía clases siguiendo nuevos métodos pedagógicos e ilustrando los principios fundamentales del Humanismo.

En cualquier caso, de sus estudios y formación no se tienen noticias concretas hasta su matriculación en la Academia de Cracovia. Cabe pensar, no obstante, que adquirió una buena base en las materias que luego fueron de su interés universitario y que, seguramente en estos años de escuela, se despertó ya su curiosidad por entender los mecanismos siderales.

LA ASTRONOMÍA Y LA MEDIDA DEL TIEMPO

Entre esos mecanismos que el adolescente Copérnico empezaba a conocer, uno de los primeros debió de ser la relación entre los movimientos que se daban en los cielos y el cómputo del tiempo. No tiene nada de extraño, ya que, desde muy antiguo, el hombre se ha sentido fascinado por la repetición periódica de ciertos eventos y por su carácter dual: la salida y la puesta del sol, el día y la noche, el invierno y el verano; así como por la aparición en el cielo de ciertos fenómenos aparentemente impredecibles, como los eclipses. Por otra parte, esa repetición periódica debió de llevar al *Homo sapiens*, en momentos muy tempranos de su evolución, a intentar medir el tiempo por razones prácticas. De hecho, la complejidad de su organización social estuvo quizá vinculada a ello; por ejemplo, la predicción de la naturaleza cíclica de las estaciones entronca con aspectos que debieron de condicionar el nacimiento de la agricultura y, por ende, el abandono del nomadismo. Por eso no es arriesgado declarar que la astronomía es posiblemente una de las ramas más antiguas de la ciencia, muy vinculada desde sus orígenes con todo tipo de predicciones, unas de carácter «natural» y otras que entran en lo que podríamos llamar «artes adivinatorias».

La observación del cielo permitió confirmar la repetición de las estaciones o ayudar a la orientación. Pero la simple observación no era suficiente; el uso de las matemáticas hizo posible añadir un elemento cuantitativo que debe considerarse como el inicio de una verdadera ciencia astronómica. Desde hace cinco mil años está confirmada la existencia de calendarios que reflejan, con mayor o menor precisión, la sucesión temporal; se sabe que ya en la I dinastía egipcia se disponía de un calendario de carácter solar-lunar, que fijaba el inicio del año a partir de la reaparición de Sirio en el horizonte antes de la gran inundación anual.

Aunque probablemente el origen de los primeros calendarios haya que buscarlo en la necesidad de organizar el tiempo tanto de las fiestas comunes como de los trabajos con propósito religioso, administrativo o comercial —lo que no requiere una gran precisión—, la curiosidad científica llevó pronto a idear procedi-

EL CALENDARIO AZTECA

Además del calendario egipcio y del mesopotámico, también son muy conocidos los calendarios mesoamericanos, como el azteca o mexica, con ciclos de ajuste más complejos, ya que coexisten el año sagrado de 260 días y el año natural de 365, formando ciclos que se repiten cada 52 años; estos ciclos se agrupaban, a su vez, hasta formar grupos de 5200 años llamados «soles». Incluso nuestro calendario, dada la duración relativa del día y del año, precisa un ajuste que se solventa con la inclusión de los años bisiestos.



La famosa Piedra del Sol, frecuentemente llamada «Calendario Azteca». Refleja la cosmogonía mexica, con el dios solar en el centro y las cuatro eras a su alrededor. En el anillo exterior se ven dos serpientes de fuego enfrentadas, que arrastran el Sol por el firmamento.

mientos que permitieran realizar medidas de la duración del año con un margen de error relativamente pequeño.

La medición precisa del día y su organización en partes iguales que pudieran, a su vez, medirse formó parte de ese mismo afán. Pronto debieron de nacer los relojes solares e incluso el concepto de portabilidad, ya que se ha encontrado un artilugio de este tipo en época del faraón Tutmosis III (ca. 1450 a.C.).

Los calendarios que usaban la luna como referencia para los meses parecen ser los más antiguos. Se discuten evidencias de entre el 15000 y el 25000 a.C. como pruebas concluyentes. Sin embargo, esos calendarios no son compatibles con el ciclo anual

del sol, por lo que hicieron su aparición otras opciones que combinaban los ciclos lunares y los solares y que, en general, requerían un complejo sistema de sincronización de ambos. Tal sistema se basó en la intercalación de períodos temporales cada cierto número de meses o años, para evitar el progresivo desfase de estos calendarios.

El calendario solar más antiguo que se conoce es de origen egipcio. En la IV dinastía (hacia el año 2500 a.C.) era usado ampliamente; constaba de 12 meses de 30 días, más 5 días extras que servían para evitar desfases. Más o menos en esa época, los sumerios contaban con un calendario similar, compuesto de 12 meses iguales de 30 días.

El joven Copérnico no conoció seguramente la mayoría de esos calendarios, pero sí debió de tener noticia, a través de sus profesores, de los problemas que presentaba el calendario oficial usado en ese momento en toda la Cristiandad: el calendario juliano.

Griegos y romanos habían utilizado sucesivas medidas del año organizadas en un número de meses variable hasta que, en el año 46 a.C., Julio César —con la ayuda del astrónomo Sosígenes de Alejandría— impuso un calendario de 365 días, repartidos en 12 meses, con un día extra cada cuatro años: así lo ajustaba más al ciclo solar de 365 días y casi 1/4. Usando este calendario, la Iglesia estableció, durante el primer Concilio de Nicea del año 325, las fiestas móviles de su liturgia.

Sin embargo, la duración del año no es exactamente 365 días y 6 horas, como está implícitamente supuesto en el calendario juliano, sino 365 días, 5 horas y unos 49 minutos. Consecuentemente, cada año se iba produciendo un desfase progresivo: 11 minutos al año. Hacia el año 1500 esa diferencia venía a corresponder a un adelanto de unos 10 días, lo que motivó grandes discusiones sobre la precisión de este sistema de medida y un creciente consenso en que era necesario modificar el calendario usado hasta entonces. En el decenio de 1510 a 1520, Copérnico fue consultado al respecto y manifestó su opinión, contraria a una reforma prematura, por considerar que no se tenía aún una medida suficientemente precisa de la duración del año. Más adelante trataremos con detalle esta reforma.

LOS ESTUDIOS EN CRACOVIA

Está documentalmente confirmado que Copérnico aprobó el examen de ingreso en la Academia de Cracovia, ocupando un lugar intermedio entre los sesenta y nueve aspirantes admitidos en el año 1491, hecho que quedó registrado en el *Album Studiosorum* de la universidad. Allí se matriculó en la Facultad de Artes Liberales, en la que se seguían cursos relacionados con lo que hoy llamaríamos «disciplinas científicas», dado que dejaban fuera aquellas materias expresamente relacionadas con los estudios teológicos.

En ese momento, el plantel de profesores de la Academia tenía poco que envidiar, tanto en cantidad como en calidad, a las grandes universidades de la Europa occidental. El curso comenzaba en octubre y estaba organizado en dos semestres. En general, la jornada de mañana se dedicaba a las clases teóricas y la de tarde a discusiones sobre temas preestablecidos y normalmente orientados por alumnos de cursos superiores.

Nicolás acudió a la universidad con su hermano Andrés. Ambos jóvenes debieron de quedar fascinados por aquella atractiva ciudad que era Cracovia, capital del reino, en la que la Academia era mimada por la familia real y los burgueses ricos. La universidad, con un alumnado de más de dos mil estudiantes, era equiparable a la de cualquier institución de su clase en Europa. La Academia de Cracovia puede considerarse uno de los focos principales de irradiación del pensamiento renacentista. Son numerosas las citas que elogian la labor de esta universidad y su papel en la construcción de la nueva cultura que brotaba imparable e iba a cambiar el panorama europeo. El propio Erasmo, amigo de dos obispos de Cracovia, no dudó en alabar el trabajo que allí se realizaba.

Más aún, la universidad parecía implicarse en los problemas de la sociedad en la que se incardinaba. Así, su rector recibió el encargo del rey de ser quien defendiera ante la Santa Sede, en la dieta de 1415, los argumentos contra la Orden Teutónica. Y es interesante señalar que, un siglo antes de que Bartolomé de las Casas clamara contra quien pretendía imponer a los indios ame-

ricanos un sistema de creencias, los teólogos de Cracovia hablaban ya en términos similares sobre la igualdad de los hombres: «No hay diferencia entre paganos y cristianos en cuanto al derecho a vivir y poseer, y es inhumano querer convertir infieles por la fuerza de las armas».

LA ACADEMIA DE CRACOVIA: PRIMEROS DOSCIENTOS AÑOS

En 1364, el rey Casimiro el Grande recibió permiso del papa para establecer en Cracovia, capital de Polonia, una universidad, que sería la segunda fundada en la Europa Central. El Estudio General de Cracovia no comenzó a funcionar hasta 1367, con tres facultades: Artes Liberales, Medicina y Derecho. Siguiendo las pautas de las universidades de Bolonia y Padua, los estudiantes tenían derecho a elegir al rector. La muerte prematura del rey en 1370 significó un duro golpe para la naciente universidad, que perdió su impulso inicial y quedó estancada. Afortunadamente, en 1400, consolidada la dinastía Jagellón que hoy da nombre a la institución, este gran centro de estudios fue restablecido con el nombre de Academia de Cracovia. Organizada como cualquier otra universidad medieval, estaba estructurada en cuatro facultades. La reorgani-



Página del *Album Studiosorum* o libro de registro de estudiantes matriculados en la Academia cracoviana en 1491. En la octava línea aparece el nombre de Copérnico.

A este ambiente se incorporaron los hermanos Copérnico. Se desconoce su domicilio durante su época universitaria, aunque seguramente utilizaron uno de los siete Colegios Mayores existentes, dadas las ordenanzas que regían respecto al alojamiento de los estudiantes universitarios.

zada institución seguía los patrones de la Universidad de París, por lo que el rector era elegido solo por los profesores. Pronto la refundada Academia se convirtió en un referente europeo en el ámbito de la cultura. En la segunda mitad del siglo XV, las matemáticas, la astronomía y la astrología florecían en ese centro docente, que contó con famosos profesores y grandes discípulos. En la primera mitad del siglo XVI, la Academia rechazó las ideas de la Reforma. El rector, en colaboración con el obispo, censuró el material impreso que pudiera ser considerado herético. Los profesores que abrazaron el protestantismo se vieron obligados a abandonar la universidad y la ciudad. Desde ese momento, la Academia adoptó una postura estrictamente escolástica y el número de alumnos descendió considerablemente. Sin embargo, pese a lo que podía significar de heterodoxia, en el período 1578-1580, la Academia de Cracovia comenzó a impartir cursos sobre la obra capital de Copérnico.



Patio del Collegium Maius de la Academia de Cracovia. Hoy es el edificio principal de la Universidad Jagellónica.

LA CÁTEDRA DE MATEMÁTICAS

Una de las joyas de la corona de esta universidad era, sin duda, su cátedra de Matemáticas, que recibía el reconocimiento general de otras instituciones similares. Fundada en 1410, es considerada la primera de Europa en su género. En ella se enseñaba aritmética, geometría euclidiana, óptica geométrica y numerosos temas relacionados con la astronomía.

La personalidad más destacada en la Universidad de Cracovia en los tiempos de Copérnico como estudiante era sin duda Wojciech de Brudzewo (1446-1497), quien, pese a haber abandonado la enseñanza de la astronomía el año anterior al de ingreso de Nicolás, ejerció sobre él su magisterio a través de discípulos directos que sí le dieron clase, así como mediante los textos que había escrito durante sus años de actividad en esta cátedra. Entre otros, sus comentarios a las *Nuevas teorías de los planetas*, de Georg von Peuerbach (1423-1461).

Por otra parte, Brudzewo abría su observatorio a estudiantes interesados y parece seguro que Copérnico realizó allí sus primeras observaciones astronómicas.

Brudzewo fue un gran innovador de la enseñanza de la astronomía, poniendo en contacto a los estudiantes con los textos más avanzados de la época. Sus enseñanzas sobre la obra de Peuerbach ayudaron considerablemente a los estudiosos del departamento de Matemáticas a la mejor comprensión del sistema ptolemaico y de sus problemas, poniendo a su alcance el *Almagesto* y planteando la necesidad de traducir la gran obra de Ptolomeo a partir del original griego. Se manifestó escéptico sobre el conjunto de las teorías de Ptolomeo y estudió con gran detalle la órbita lunar. Estas ideas acompañaron al joven Nicolás a lo largo de toda su vida.

Directo habría de ser, en cambio, el ascendiente de Jan de Glogow (1445-1507), que en 1507 publicaría un tratado sobre los principios de la astronomía como apéndice al *Tractatus de sphaera* de Johannes de Sacrobosco (ca. 1195-1256). Se piensa que Glogow tuvo una importante influencia en la formación de Copérnico, especialmente por su interés en el análisis crítico

de la teoría geocéntrica. Su actividad en la Academia de Cracovia fue enorme: escribió diversos manuales sobre gramática, lógica, filosofía, geografía, astronomía y astrología; especialmente curiosos son sus «pronósticos», en los que se ha querido ver que predijo la aparición de Lutero. Fue autor también de un libro titulado *Introductio in artem numerandi* (1497).

«La matemática posee no solo verdad, sino también belleza suprema; una belleza fría y austera [...], pero sublime y pura, y capaz de una perfección severa como solo las mejores artes pueden presentar.»

— **Bertrand Russell** («Sobre las matemáticas», *Misticismo y lógica*, 1918).

Desde luego, debieron de ser numerosos los cursos relacionados con la astronomía que el joven Copérnico estudió durante esos años. Esta es una de las ocasiones en las que el celo administrativo nos ha legado un conocimiento detallado sobre ese conjunto de materias. Se tiene constancia de que siguió, en el semestre de invierno de 1491, el curso de Wojciech de Pniewy, *De sphera* (basado en el mencionado *Tractatus de sphaera* de Johannes de Sacrobosco). En el mismo semestre de 1492, sigue el de Bartlomiej de Pipnica sobre los *Elementos* de Euclides. En el semestre de verano de 1493, atiende los cursos sobre *Teorías planetarias*, de Szymon de Sierpe, así como el curso sobre *Tablas de eclipses*, de Bernard de Biskupie, y también sobre *Astrología*, de Wojciech de Szamotuly. En el siguiente semestre, encontramos a Copérnico en el curso de Michal de Wroclaw: *Tabulae resolutae*. Finalmente, hay constancia de que, en el semestre invernal del curso 1494-1495, asistió a las clases de Wojciech de Szamotuly que trataban de los cuatro libros *(Tetrabiblion)* de Ptolomeo. Sin entrar en otras consideraciones, podemos inferir que el estudiante Copérnico estaba ya claramente interesado en la ciencia astronómica.

No debemos pensar que los cursos de astronomía que siguió Copérnico eran cursos reglados en el sentido moderno. Más bien

consistían en cursos de matemáticas que introducían la visión aristotélica y la visión ptolemaica del universo y que permitían al estudiante entender el calendario, así como calcular las fechas de los días sagrados y también desarrollar habilidades que le abriesen las puertas a una profesión de carácter más práctico, como podía ser, por ejemplo, la navegación. Asimismo, entre las materias «prácticas» se enseñaba la astrología, sobre todo la elaboración de horóscopos y cartas astrales en función de la fecha y hora del nacimiento.

Por otra parte, en el Departamento coexistían dos visiones diferentes, que podemos considerar como el contrapunto entre la visión medieval, anclada en una tradición más filosófica que científica, y la emergente visión humanista, más en concordancia con el método científico. En esos tiempos se enseñaban dos sistemas cosmológicos distintos: el de los «naturalistas» y el de los «matemáticos». Como ya se ha dicho, los naturalistas explicaban el modelo de esferas homocéntricas de Aristóteles como algo «real»; por su parte, los matemáticos enseñaban el modelo ptolemaico como un «método de cálculo», un «artificio» que no necesariamente se adecuaba a la realidad, pero que permitía predecir con una aproximación razonable el curso de los planetas. Seguramente, a una mente tan sutil como la de Copérnico debió de resultarle preocupante esa disyuntiva en un punto en el que sería de esperar una concordancia completa. Tener que convivir con ese tipo de trucos para explicar lo que la matemática probaba no entraría en lo que un hombre de ciencia guiado por la razón admitiría como solución a un problema.

Respecto a sus libros de cabecera, se sabe que, cuando cursaba sus estudios en Cracovia, Copérnico adquirió varias obras importantes: los *Elementos* de Euclides publicados en Venecia en 1482, una copia de la segunda edición de las *Tablas alfonsíes*, impresa también en Venecia en 1492, y las *Tablas de direcciones* de Regiomontano, publicadas en Augsburgo en el año 1490. Estas copias, con anotaciones suyas en los márgenes y firmadas, se han podido conservar.

A la vista de sus libros, podemos inferir en Nicolás un obsesivo interés por colectar datos que le permitieran contrastar o



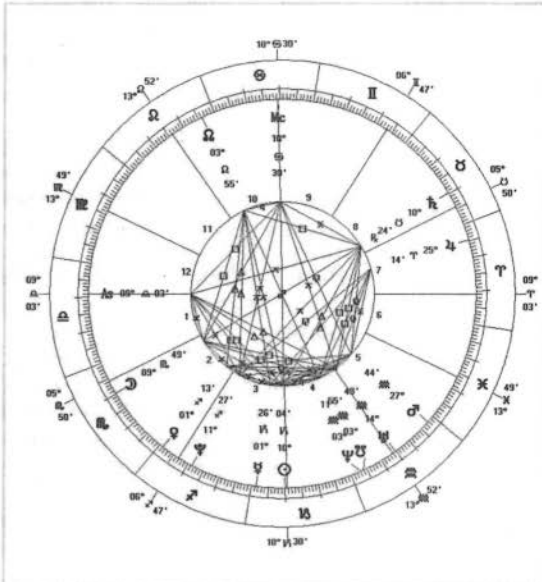




FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Grabado del astrónomo polaco Nicolás Copérnico, que revolucionó la visión del cosmos que había predominado durante siglos.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Ejemplo de carta astral u horóscopo, En la época de Copérnico, la astronomía y la astrología eran dos disciplinas unidas.

FOTO INFERIOR:
El *Tractatus de sphaera* o *De sphaera,* de Sacrobosco, fue escrito hacia 1220 y adoptado como texto astronómico de referencia en las escuelas europeas en época de Copérnico.

TABLAS ASTRONÓMICAS

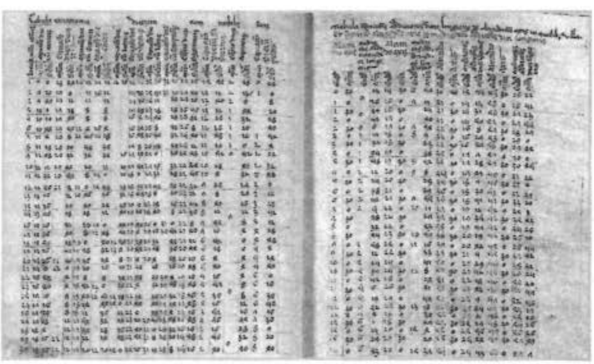
Dado el número de cuerpos celestes que se iban identificando, se hizo necesario registrar sus posiciones en diferentes épocas del año. El primer catálogo conocido data del siglo III a.C. y se debe al astrónomo alejandrino Timocaris, ayudado por Aristilo. El propio Ptolomeo, en su *Almagesto,* incluye una relación de cuerpos celestes. Especial mención, entre las compilaciones de estrellas que se han conservado, merecen las *Tablas alfonsíes* y el *Catálogo de las estrellas.*

Las *Tablas alfonsíes*

Elaboradas entre 1263 y 1272, bajo el patrocinio de Alfonso X el Sabio (1221-1284), rey de Castilla y León, su objetivo era proporcionar un mecanismo para calcular las posiciones del Sol, la Luna y los planetas según el sistema ptolemaico. Se basaron en el trabajo previo del astrónomo andalusí del siglo XI Azarquiel. La influencia de las *Tablas alfonsíes* fue enorme en toda Europa. Aún se usaban durante el Renacimiento, época en que se hicieron numerosas impresiones en distintos lugares. Copérnico tenía una copia de estas *Tablas* entre sus libros de cabecera.

El *Catálogo de las estrellas*

Fue creado en Samarcanda, bajo la supervisión de Ulugh Beg (1394-1449), nieto de Tamerlán. Es conocido como *Zij-i Sultani* (1437) y contiene una recopilación del movimiento del Sol, la Luna y los planetas, así como un catálogo de unas mil estrellas. Se basó en las tablas denominadas *Zij-i ilkhani*, elaboradas en el siglo XIII por al-Tusi, astrónomo persa que realizó su labor científica en el observatorio de Maragheh, en el Azerbaiyán iraní. A diferencia de lo ocurrido con las *Tablas alfonsíes,* el *Zij-i Sultani* no tuvo un impacto directo significativo sobre los astrónomos europeos, aunque fue muy usado entre los orientales.



Una página de las *Tablas alfonsíes* o *alfonsinas,* así llamadas en honor del rey Alfonso X el Sabio. Estas tablas astronómicas permitieron durante siglos calcular las posiciones de los astros a muchos astrónomos europeos, incluido Copérnico, que tenía un ejemplar.

bien contestar las ideas cosmológicas que le inculcaban sus maestros en la Academia. El texto de Euclides nos habla de su inquietud por la geometría y ambas *Tablas* corresponden a medidas ampliamente aceptadas por la comunidad astronómica del momento.

Aparte de su entrega a los estudios teóricos, es razonable considerar que alguien que mostraba tanto interés en la astronomía no dejara de aprovechar cualquier oportunidad para profundizar en ella, en especial en aquellos aspectos que estaban menos desarrollados en las clases de aula. En este sentido, aunque Copérnico nunca fuera alumno directo de Wojciech de Brudzewo, puede pensarse que acudiría al observatorio que este científico había instalado en su casa. Por otra parte, desde el año 1444, en época del profesor Jan de Olkusz, existía la tradición de enseñar la construcción y el uso de cuadrantes y astrolabios en el Colegio Mayor (Collegium Maius). Pero fue en los años en los que Nicolás era estudiante cuando Marcin Bylica (1433-1493), antiguo profesor en Cracovia, murió en Buda cuando ejercía de astrónomo en la corte húngara y legó sus instrumentos a la Academia, donde todavía se conservan. En concreto, en 1494, llegaron a Cracovia tanto su biblioteca como un astrolabio árabe del siglo XI y un globo celeste o esfera armilar, construido en Viena por Juan Dorn hacia 1480.

Pero, aparte de los cursos formales y de la relación con sus profesores, una universidad como la de Cracovia facilitaba a su *collegium* la posibilidad de interaccionar con profesores de toda Europa, que llegaban atraídos por el ambiente intelectual, por la tolerancia y por el hervidero cultural en que la institución se había convertido. En Cracovia se había conformado una corporación profesional que proporcionaba condiciones adecuadas para entregarse a una actividad intelectual sin distinciones de nacionalidad o religión.

En ese ambiente, un estudiante de espíritu tan inquieto como era Copérnico debió de trabar relación con profesionales del campo científico que más le interesaba, la astronomía, y seguramente las utilizaría para ampliar los conocimientos que, sobre ella, recibía en las aulas.

LA ASTRONOMÍA ANTES DE PTOLOMEO

La observación del cielo ha ocupado a todas las culturas, que, dependiendo de su grado de madurez evolutiva, han considerado su descripción bajo modelos que van de lo puramente mítico o religioso hasta lo científico. Hace más de cinco mil años, los egipcios ya intentaban encontrar una explicación a los fenómenos observados en el cielo y pretendían conectarlos con los sucesos que afectaban a los individuos o a las naciones. Nacieron así, fuertemente trabadas, la astronomía y la astrología, que combinaban el saber y la fantasía de quienes comenzaron a cultivarlas.

Quizá la idea más importante desarrollada por los antiguos egipcios en este ámbito fue el concepto de tiempo, distinguiendo su curso lineal y los comportamientos cíclicos asociados a ciertos fenómenos naturales (las inundaciones anuales del Nilo, por ejemplo). Aparte de los calendarios, existen evidencias arqueológicas que se remontan al milenio II a.C. y que contienen datos bastante precisos sobre la trayectoria de Venus. Un ejemplo significativo es el reloj estelar hallado en la tumba del faraón Ramsés VI, en el Valle de los Reyes. En este sentido, se tiene constancia de que, unos 1300 años antes de nuestra era, los egipcios habían identificado ya cuarenta y tres constelaciones y los cinco planetas visibles, existiendo numerosa información sobre ellos.

En otras civilizaciones también se compartió el mismo interés por la bóveda celeste. Los astrónomos chinos registraron el primer eclipse de sol conocido, unos dos mil setecientos años antes de nuestra era. Pero probablemente fueron los babilonios quienes, hacia 1800 a.C., aplicaron por primera vez las matemáticas al estudio de la bóveda celeste, en particular a los fenómenos periódicos que en ella pueden observarse.

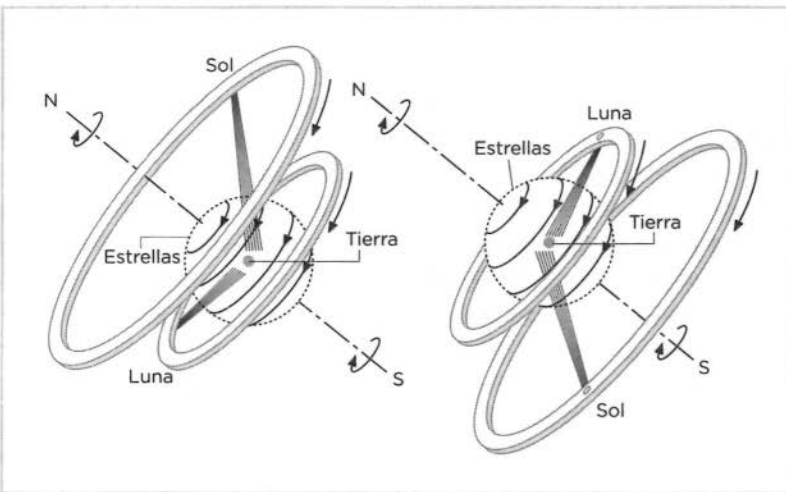
Entre las tablillas cuneiformes encontradas, la de Ammisaduqa (número 63 del *Enuma Anu Enlil*), conservada en el Museo Británico, lista posiciones de Venus sobre un período de 21 años, lo que podemos interpretar como la primera prueba de estudio sistemático sobre fenómenos planetarios.

Entre los caldeos, ya en el Imperio neobabilónico, se hicieron numerosas observaciones que condujeron a tener conoci-

miento empírico sobre algunos planetas, aunque no parece que eso generara una cosmología que haya llegado hasta nuestros días. Por ejemplo, determinaron que el Sol no se mueve de manera uniforme a lo largo de la eclíptica, descubrieron formas de predecir eclipses y compilaron los primeros catálogos de estrellas conocidos.

Sin embargo, muchas de esas observaciones se encontraban en un estadio precientífico. Ninguna de esas civilizaciones, ni tampoco otras que llegaron a realizar precisas mediciones cronológicas —caso de los mesoamericanos o de los incas— han dejado trazas de que establecieran un modelo que reflejase los movimientos de los astros ni la posición de la Tierra respecto a ellos. Sus interpretaciones conducen a cosmologías que tienen más de míticas que de rigurosas.

Fueron los griegos quienes comenzaron a interesarse por establecer una cosmología que fuera más allá de una leyenda. Tales de Mileto (ca. 630-545 a.C.) predijo un eclipse de sol el 29 de mayo del 585 a.C. En su visión, la Tierra es un disco que flota en el mar y está cubierto por una cúpula: el cielo y sus estrellas. En ese mismo siglo, Anaximandro (610-546 a.C.) propuso un modelo en el que la Tierra habitada es una sección de un cilindro y ocupa el



Reconstrucción gráfica del modelo del cosmos según Anaximandro: a la izquierda, en un día de verano; a la derecha, una noche de invierno. El Sol, la Luna y los planetas son como huecos en unas ruedas invisibles que rodean la Tierra.

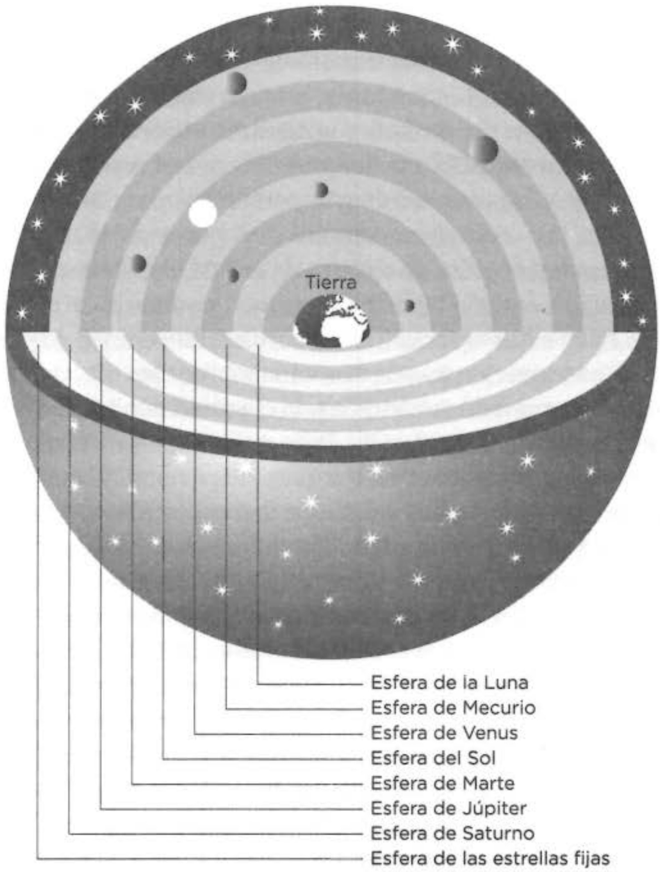
centro de todo. La altura del cilindro es un tercio de su diámetro. El Sol, la Luna y los planetas son huecos en unas ruedas invisibles que rodean la Tierra. Pitágoras (ca. 580-495 a.C.), a su vez, sugirió que la Tierra es una esfera y que todo el universo es también esférico. Para ayudar a la navegación, Timocaris de Alejandría (320-260 a.C.) y Aristilo (siglo III a.C.) realizaron un catálogo con las posiciones aparentes de diversas estrellas.

Pero es de Aristarco de Samos (310-230 a.C.) de quien tenemos constancia de que estableció un primer modelo en el que la Tierra gira alrededor del Sol, y no al revés. Esta idea le valió un rechazo generalizado, al contradecir lo que parece ser la experiencia general de que nuestro planeta no se mueve. Pocos debieron de ser sus seguidores, porque astrónomos posteriores siguieron admitiendo una visión geocéntrica.

Por su parte, Eratóstenes (276-194 a.C.) midió con gran aproximación las distancias al Sol y la Luna, determinó el tamaño relativo de ambos astros respecto a la Tierra y calculó con bastante precisión la circunferencia terrestre, un hecho considerado como uno de los momentos estelares de la historia de la ciencia. Hiparco de Nicea (190-120 a.C.) descubrió la precesión de los equinoccios, estudió el movimiento de la Luna y determinó la duración del año. Solo Plutarco de Queronea (46-120), el autor de las *Vidas paralelas*, se atrevería a plantear, ya en época cristiana, la imposibilidad de que el universo, si es infinito, pueda tener un centro.

Copérnico comenzó a conocer a estos astrónomos durante sus estudios en Cracovia. La mayoría le llegaba en referencias muy posteriores, lo que le condujo a la búsqueda de fuentes más directas, preferiblemente en el idioma original. De ahí nació su interés por aprender griego con la suficiente soltura como para poder sumergirse en un mundo que le resultaba apasionante.

Como ya hemos indicado, en tiempos de Copérnico la obra de Aristóteles (384-322 a.C.) dominaba aún, casi dos mil años después de ver la luz. Su concepción del cosmos estaba basada en una visión puramente filosófica. Para Aristóteles, el universo está dividido en dos partes, la región terrestre y la celeste. En la primera, todos los seres están formados por una combinación de



Representación del modelo cosmológico de Aristóteles, cuyas ideas perduraron casi dos milenios. El universo estaba dividido en dos partes: el mundo sublunar, formado por los cuatro elementos, y el mundo supralunar, formado por la quinta esencia. La Tierra está en el centro, pero es imperfecta, irregular, no completamente esférica. Más allá de la Luna, todo es perfecto: circular, de movimiento uniforme, con astros totalmente esféricos y encerrados en esferas de cristal, formados por éter... Todo este edificio mental se derrumbaría con la Revolución Científica, iniciada por Copérnico.

cuatro elementos: tierra, fuego, aire y agua; en cambio, la parte del universo que está más allá de la Luna, es decir, el Sol, los planetas y las estrellas, estaría formada de una quinta esencia: el éter.

Este éter sería una sustancia pura, perfecta, claramente diferenciada de los elementos que formaban la Tierra. El límite entre las dos regiones del cosmos lo marcaba la Luna, de tal manera que la región terrestre debía ser llamada «sublunar» y los cielos recibían el nombre de región «supralunar». La Luna, en la frontera

entre ambas zonas, estaba formada por esa quinta esencia, pero contaminada por su proximidad a nuestro planeta.

Desde una perspectiva dinámica, el estado de reposo sería connatural con la región sublunar, mientras que la región supralunar debía estar en movimiento, siguiendo trayectorias perfectas, esto es, circulares, dado que la circunferencia y la esfera son figuras geométricas que encarnaban la perfección para Aristóteles. El Sol, la Luna, las «estrellas errantes» (los planetas) y las estrellas fijas estarían encerrados en esferas de cristal, compuestas de éter, sin separación entre ellas. En un orden que iba de la Luna a las estrellas fijas, estas esferas irían incardinándose unas en otras de manera homocéntrica (o sea, con el mismo centro).

Aristóteles prestó atención a una cosmovisión que hoy parece totalmente alejada de la ciencia. Pero cuando determinados astrónomos intentaron casarla con los datos experimentales obtenidos a partir de sus observaciones de los astros, se hizo preciso complicar cada vez más ese modelo. De esta manera se llegó al *Almagesto* de Claudio Ptolomeo (100-170). En dicha obra, el astrónomo alejandrino estableció su cosmovisión, en la que la Tierra, inmóvil, ocupa el centro del universo. Aparte de sus indudables elementos positivos, el modelo geocéntrico encontró un contexto sociopolítico en el que recibió una acogida favorable. Su concordancia con las elucubraciones aristotélicas, imperantes en la época, y los argumentos que aportaría ciento cincuenta años más tarde a la ideología de la Iglesia, reconocida como religión del Imperio, dieron a este modelo una consistencia duradera. Trece siglos habrían de transcurrir hasta que Copérnico demostrara que nuestro sistema solar gira alrededor del Sol.

El modelo ptolemaico era considerado todavía en tiempos de Copérnico como un artificio matemático que establecía un puente entre la visión cosmológica que la filosofía y la religión apoyaban y las medidas empíricas llevadas a cabo por los astrónomos. Este dilema acompañará a Copérnico hasta el final de sus días. Tomar la decisión de publicar un nuevo sistema y, sobre todo, el admitir que no se trataba de un nuevo juego matemático sino de una realidad física constituyó con toda probabilidad la raíz de sus dudas a lo largo de toda su vida.

TIEMPOS DE CAMBIO

En su época estudiantil, Copérnico entró en contacto con la llamada Sodalitas Vistulana, una asociación cultural que preconizaba una revalorización del platonismo frente a las ideas aristotélicas imperantes. Fue fundada en 1489, muy poco antes de que Nicolás se matriculase en la universidad, por Conrad Celtis (1459-1508), un reconocido humanista alemán.

En esta sociedad se reunía gente inquieta: profesores jóvenes, eclesiásticos de ideas modernas, miembros cultos de la sociedad cracoviana. Se discutía sobre literatura, historia, filosofía, geografía y ciencia. De estas discusiones surgían posiciones enfrentadas a la escolástica tradicional, lo que pronto hizo que los sectores más conservadores tildasen a los miembros de esta sociedad de iconoclastas. Incluso participaban damas en las reuniones, lo que significaba también una novedad. En el fondo se trataba de un foco cultural que irradiaba las nuevas ideas renacentistas como en tantas otras universidades europeas. Cracovia era la capital del reino de Polonia y, de la misma manera que en París o Roma, la sociedad comenzaba a respirar aires de cambio. Precisamente Celtis, que ejerció gran influencia sobre las élites polacas, llegó a Cracovia para estudiar matemáticas y astronomía con Wojciech de Brudzewo. La relación de Copérnico con los miembros de la Sodalitas Vistulana le llevó a valorar la riqueza del pensamiento grecorromano y a interesarse por leer a los clásicos en latín. Asimismo, dado que los originales de muchas de esas obras estaban en griego, se tuvo que despertar en el joven el interés por aprender también esa lengua.

En el año 1489 llegó a Cracovia un ejemplar del libro *De sole et lumine*, de Marsilio Ficino, un destacado humanista y filósofo neoplatónico que enseñaba entonces en la Universidad de Florencia. Es posible que la lectura y la discusión de esta obra en la Sodalitas Vistulana fueran el germen de la nueva visión cosmológica que se iría gestando en Copérnico. Ficino, desde una perspectiva puramente filosófica, consideraba al Sol ocupando el centro del cielo, en concordancia con las ideas neoplatónicas. En la obra capital de Copérnico, *De revolutionibus*, pueden encon-

LA ERA DE LOS DESCUBRIMIENTOS

La segunda mitad del siglo XV y la primera del XVI son consideradas como el momento histórico en el que se producen los mayores descubrimientos geográficos. Hasta ese momento, los europeos mantenían relaciones comerciales por tierra con Asia central, China e India, así como con el norte de África. Durante los cien años que duró aproximadamente este período se abrieron rutas marítimas con América, toda África y Asia. En cierta manera, el descubrimiento de América marcó un cambio de paradigma en el modelo de nuestro planeta, cambio equivalente al que se produjo, también en la misma época, en el modelo del cosmos. Exploradores que se basaron en conocimientos olvidados o suposiciones arriesgadas se atrevieron a lanzarse en pos de una dudosa aventura en la que muchos perdieron hacienda o vida e incluso ambas.

Pioneros portugueses y exploradores españoles

Fundamentalmente fueron España y Portugal los dos países que se implicaron en esas empresas, consideradas descabelladas al principio. Los portugueses iniciaron esta era avanzando hacia el sur de África. En 1482, Diego Cao alcanzó la desembocadura del río Congo. Seis años después, Bartolomé Díaz dobló el cabo de Buena Esperanza y alcanzó el océano Índico. Y Vasco de Gama alcanzaría India en 1498. Pero fueron los españoles, comandados por un genovés, Cristóbal Colón, quienes alcanzaron un nuevo continente tras navegar hacia el oeste para así intentar llegar al este, dado que se suponía que la Tierra era redonda. En 1492 descubrieron las Indias Occidentales, luego bautizadas como América. También la corona española sufragó la circunnavegación del planeta, que tuvo lugar entre 1519 y 1522, primero bajo el mando del portugués Fernando de Magallanes y, a la muerte de este, del español Juan Sebastián Elcano. La gesta acabó con cualquier duda respecto a la forma esférica de nuestro planeta. ¡La esfericidad de la Tierra se había comprobado, empíricamente, por primera vez!

trarse párrafos que pudieran deberse a esta lectura temprana del autor florentino: «Algunos lo llamaban (al Sol) faro del mundo. [...] Así pues, el Sol [...] dirige a la familia de los planetas, que giran alrededor de él».

De esta manera, en el joven estudiante, que bebía de sus maestros conocimientos nuevos, se conjugaban dos fuerzas complementarias. De una parte, las atractivas ideas neoplatónicas y pitagóricas que desafiaban a la concepción aristotélica del mundo.



En el Renacimiento, la llegada de Colón a América supuso una nueva visión del mundo terrestre, al igual que la gran obra de Copérnico supuso una nueva visión del mundo celeste.

De otra, los conceptos matemáticos que se iban sedimentando en su cerebro. Pero Copérnico era ya un científico moderno y no se iba a limitar a «profesar» un modelo u otro; él respetaba el gran trabajo llevado a cabo por Ptolomeo y solo cuestionaría su modelo cuando reuniese suficiente evidencia teórica y experimental. No aceptaba una actitud especulativa, sino que intentaría fundamentar su nuevo sistema basándose en sus estudios de matemáticas y astronomía.

Copérnico abordaba el problema con paciencia, comenzando por estudiar toda la bibliografía clásica que caía en sus manos. Recopilar esos escritos y leerlos en forma crítica le llevaría largos años. Pero sabía que era necesario justificar sólidamente sus críticas a Ptolomeo. Esto le iba a exigir no solo los años que permaneció en la universidad, entregado a las matemáticas y a los clásicos, sino un trabajo que se prolongaría durante buena parte de su vida.

Tuvo que revisar concienzudamente los cálculos realizados por los astrónomos griegos, en especial los de Claudio Ptolomeo. Solo después de analizarlos y de completarlos con sus propias mediciones y las de otros astrónomos, se sentiría capaz de refutar un cuerpo de doctrina por el que, pese a que consideraba que no era correcto, sentía la admiración que despierta un trabajo científico bien elaborado. Es interesante recalcar que Copérnico fue, en sentido puro, un humanista en el que se vinculaban de manera natural las materias clásicas de Grecia y Roma con la ciencia moderna, transformando incluso la concepción filosófica del universo.

Que Cracovia —y fundamentalmente su universidad— desempeñaron un papel decisivo en la vida de Copérnico es incontrovertible, y él mismo parece que lo reconoció en numerosas ocasiones. En una carta fechada el día 22 de noviembre de 1542, Wojciech Caprinus dirigiéndose a Samuel Maciejowski, futuro obispo de Cracovia, decía:

> Nicolás Copérnico [...] ha extraído de nuestra universidad el principio de sus admirables trabajos matemáticos, los ya escritos y los que tiene intención de publicar, [...] lo que no niega [...] sino que reconoce que todo lo que es se lo debe a nuestra Academia.

Pero también hay que indicar que el influjo de esa gran institución universitaria fue el catalizador del florecimiento de las ideas renacentistas en la Polonia de la época. Al crear las bases institucionales para el trabajo organizado de un importante conjunto de sabios en las más diversas ramas del conocimiento, la Academia de Cracovia permitió el flujo de personas e ideas y se

convirtió en caldo de cultivo para la futura ciencia polaca. Fue allí donde Copérnico empezó a usar la versión latina de su nombre, abandonando el anterior Kopernik o Koppernigk de su familia. Podría decirse que con ello pretendía universalizar su proyección, pensando ya a nivel transnacional.

En la Cracovia que conoció Copérnico en esos años había otros elementos que merecen ser mencionados. En 1491, el año en que se trasladó a la universidad, se fundó la primera fábrica de papel del reino polaco. Su creador, miembro de la Sodalitas Vistulana, fue Fryderyck Schilling, probablemente abuelo de Anna Schilling, mujer de la que volveremos a hablar en un momento posterior de esta biografía.

Otros hechos importantes ocurridos en 1492 fueron la muerte de Casimiro IV y el incendio que devastó la universidad. El nuevo rey, Juan Alberto I, visitó la ciudad al año siguiente y revisó las obras de reconstrucción de los edificios afectados. Con seguridad, ese fue el año en que llegaron noticias de los descubrimientos hechos, allende el mar, para la Corona de Castilla, por un navegante genovés que había desafiado las ideas imperantes sobre la geografía terrestre.

En la Edad Media, el mundo había sido —junto con el demonio y la carne— uno de los llamados «enemigos del hombre». Ahora, en cambio, el mundo estaba ahí, al alcance del hombre, para ser descubierto por los grandes exploradores y para ser observado por los grandes astrónomos. La visión de la superficie terrestre, hasta entonces limitada a solo tres continentes, se ampliaba así de forma espectacular. Desde aquel año hasta la muerte de Copérnico, todo un enorme continente, América, pasaría a formar parte del mundo ya conocido.

Podemos imaginar la conmoción intelectual que este hecho debió de provocar en una universidad como la cracoviana. Al descubrirse que, navegando hacia el oeste, podía alcanzarse tierra firme, se rompía con conceptos largamente admitidos por la geografía. ¿Sería posible algo así en otros ámbitos de la ciencia? Surgían, por tanto, nuevas preguntas a las que los neoplatónicos intentarían encontrar respuesta. La puerta al cambio había comenzado a abrirse.

INSTRUMENTOS ASTRONÓMICOS ANTIGUOS

Antes de la aparición del telescopio, inventado en Holanda en 1608, se empleaban otros instrumentos que permitían realizar mediciones sobre las posiciones de los astros. La mayoría de estos dispositivos tuvieron también uso importante en la navegación, como elemento para determinar con precisión la posición de los navíos usando la de ciertas estrellas.

Copérnico, por tanto, solo tuvo acceso a dispositivos relativamente rudimentarios desde nuestro punto de vista actual. Debió basarse para sus observaciones en unos equipos que no eran muy diferentes de los que habían empleado los astrónomos griegos; en particular, de los utilizados por Ptolomeo. Su aprendizaje con ellos ocurrió durante sus estudios en la Academia de Cracovia, seguramente aprovechando la donación realizada por Marcin Bylica.

En esencia, los instrumentos más utilizados por los astrónomos en época de Copérnico eran el cuadrante solar, el sextante, el triquetrum, el astrolabio y la esfera armilar, de los que se conservan numerosos ejemplares. La invención del telescopio y la posterior introducción de otros equipos de medida los han ido relegando a la condición de piezas de museo.

La mayoría de esos artefactos fueron ideados por astrónomos griegos, aunque es posible que estos los tomaran de culturas anteriores. Se sabe, por ejemplo, que el reloj solar había sido usado por egipcios y babilonios desde mucho tiempo atrás. Pero no es posible determinar si dichos instrumentos se emplearon con anterioridad al siglo v a.C.

El más simple de todos es el cuadrante, que permite medir ángulos respecto a la vertical del lugar. Por medio de un limbo que corresponde a la cuarta parte de una circunferencia graduada, una plomada vinculada a él y una mira orientable al astro que se quiere observar, es posible determinar su posición a una hora y en un lugar determinados. Sucesivas mediciones a lo largo de un año permiten establecer su movimiento astral. En el recuadro de la página 46 se ilustra claramente la manera de realizar estas medidas. Una sencilla ley trigonométrica establece que el



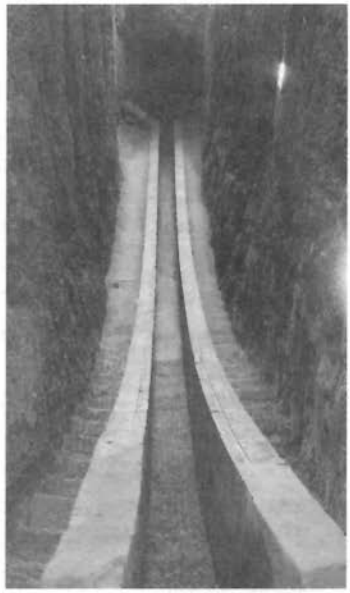


FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Cuadrante mural, o ticónico. Es el gran cuadrante de pared de Tycho Brahe, publicado en su *Astronomiae instauratae mechanica* (1598).

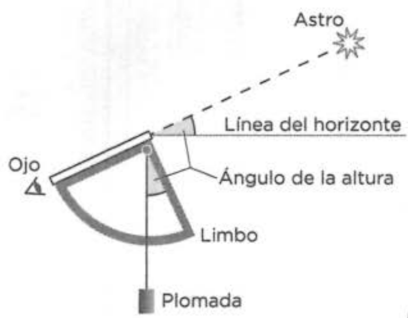
FOTO SUPERIOR DERECHA:
Sextante construido por el sultán Ulugh Beg en Samarcanda. hacia 1428.

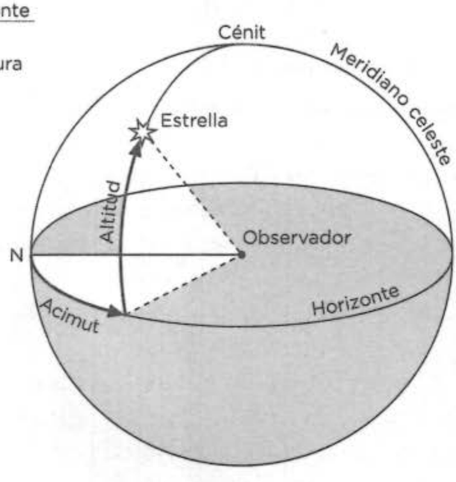
FOTO INFERIOR:
Pintura que representa a Copérnico con sus instrumentos astronómicos.



EL CUADRANTE SOLAR

Como en tiempos de Copérnico aún no se había inventado el telescopio, los esforzados astrónomos de su época —y él mismo— se vieron obligados a usar los más rudimentarios instrumentos de observación y medición. Y, sin embargo, ¡fueron capaces de cambiar nuestra visión del mundo! El más sencillo de tales instrumentos era el cuadrante solar, que permite medir el ángulo de una estrella respecto a la vertical del lugar. Y, así, saber su altitud.





En el dibujo superior, método de medida de la altitud usando un cuadrante. En el de la derecha, las coordenadas de una estrella. El acimut se mide con una brújula y la altitud con un cuadrante.

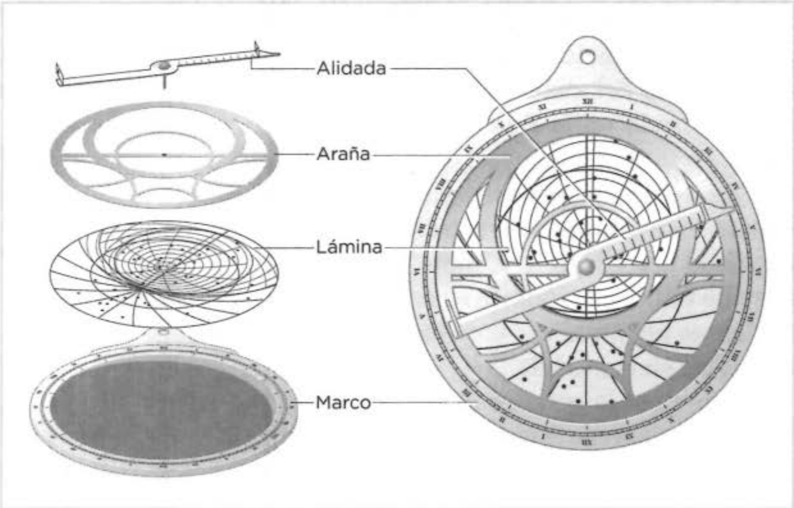
ángulo que forma la recta de observación (ojo-astro) con la línea del horizonte es igual al ángulo formado por la plomada y el otro lado recto del cuadrante. De esta forma, una vez enfocado el astro que estamos observando, la lectura directa de la posición de la plomada con el arco graduado del cuadrante nos da la altitud que queremos medir.

El sextante astronómico, que hay que diferenciar del sextante de navegación, más moderno y mucho más elaborado, es una variante del cuadrante pero con un arco menor de 90°. Fue muy utilizado en la Edad Media e incluso Tycho Brahe (1546-1601), en la segunda mitad del siglo XVI, se sirvió de él para algunas de sus mediciones. Son famosos los sextantes murales construidos por algunos astrónomos orientales, en particular el diseñado por Ulugh Beg, nieto de Tamerlán, en Samarcanda, de 40 m de radio, que todavía se conserva. La dificultad de construir sextantes tan grandes venía justificada por conseguir una mayor precisión en la medida.

Este tipo de grandes instrumentos debían construirse de tal forma que el arco de circunferencia coincidiera con el meridiano del lugar desde donde se observaba el cielo. Dado su tamaño solían ser subterráneos, con una abertura que permitiera la entrada de los rayos solares y la visualización de la bóveda celeste. El representado en la ilustración superior derecha de la página 45 utiliza una doble escala en grados y minutos. Observando a diario las posiciones alcanzadas por el Sol, a través del haz luminoso que se proyecta sobre el sextante, se podían determinar series anuales con medidas de los parámetros más importantes. Usando este aparato, el sultán y astrónomo Ulugh Beg midió con gran precisión la duración del año, medida que solo fue mejorada por Copérnico cerca de un siglo más tarde.

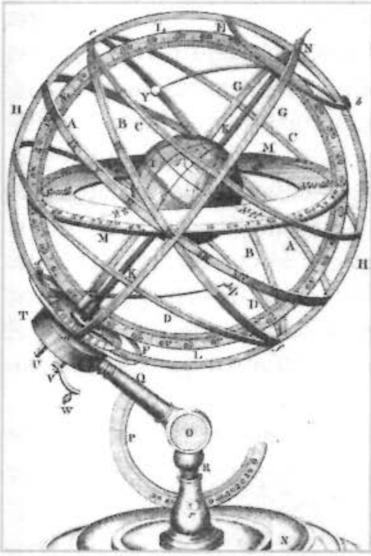
Por su parte, el astrolabio es un instrumento de mayor complejidad, que permite realizar medidas relativas más completas referidas a una latitud determinada. Se basa en la proyección estereográfica del firmamento y consta de tres elementos anidados (véase la página siguiente): una circunferencia externa, graduada, llamada *madre* o *marco*, y dos discos que se insertan uno en otro. De estos, el interior, que recibe el nombre de *araña*, lleva un visor solidario, llamado *alidada* o *regla*, que puede girar. El disco restante debe ir insertado entre la *araña* y el *marco*, en una posición fija, y depende del lugar en el que se hacen las observaciones. A este disco interno se le da el nombre de *lámina* o *tímpano*. Los árabes perfeccionaron este instrumento, pero se sabe que los astrónomos griegos ya lo emplearon, aunque se desconoce su inventor.

En la parte izquierda del dibujo, las principales piezas de un astrolabio. En la parte derecha, los componentes de un astrolabio puestos ya en su lugar. El *marco* está graduado y contiene en su interior dos discos anidados: la *lámina* y la *araña*, esta última con su visor o *alidada*.



La figura superior clarifica la estructura del instrumento. El elemento llamado *lámina* corresponde a una proyección del cielo sobre un plano; es decir, se trata de un mapa bidimensional del cielo observado desde un lugar predeterminado. Para distintos lugares, la *lámina* debe ser sustituida adecuadamente. En ella se han grabado las coordenadas de la esfera celeste correspondientes a una latitud concreta, incluyendo el cénit, el horizonte, líneas de altitud, el acimut, el ecuador celeste, la eclíptica y los trópicos de Cáncer y Capricornio. El astrolabio tiene que ser suspendido en posición vertical, usando el agujero de su parte superior. El borde de la placa *madre* o *marco* está graduado en grados y, con frecuencia, también en minutos. Por su parte, la *araña* es giratoria y representa un planisferio transparente con las posiciones del Sol, la Luna y las estrellas más brillantes del lugar. Sobre la *araña*, una aguja con visor, la *alidada*, se apunta al astro buscado. Dirigiéndola al Sol, por ejemplo, la alidada indica la hora local.

La esfera armilar, en contraste con los anteriores, es un instrumento tridimensional. Pretende representar un mapa celeste incluyendo los movimientos conocidos de los diferentes astros. Su invención se atribuye a Eratóstenes, aunque no existen pruebas fehacientes de ello. El astrolabio es, básicamente, una realiza-





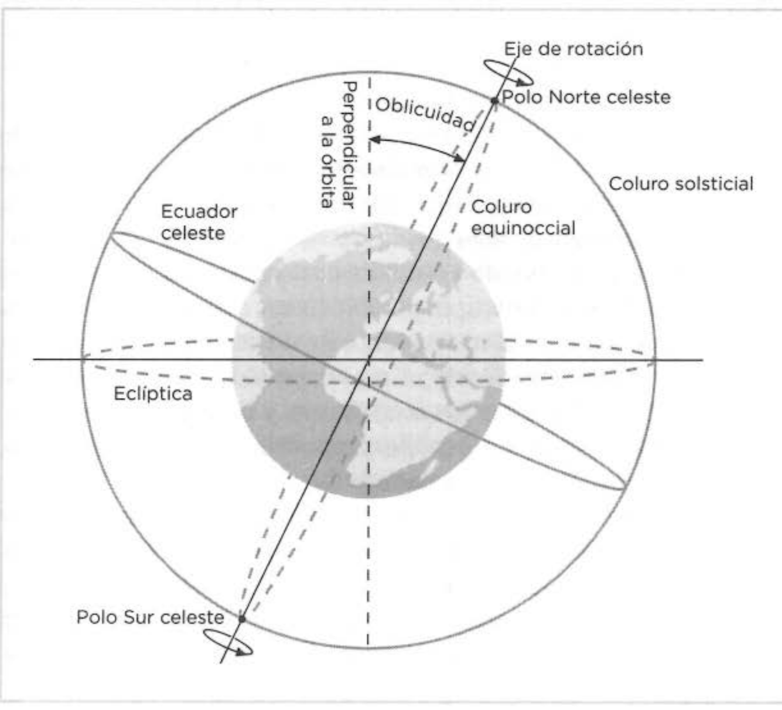


FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Componentes de una esfera armilar. Si el astrolabio se basa en una proyección estereográfica del firmamento, la esfera armilar es una representación tridimensional del mismo.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Esfera armilar que se conserva en la Universidad de Cracovia, donde Copérnico empezó a estudiar astronomía.

FOTO INFERIOR:
Explicación de las circunferencias celestes más significativas, entre ellas la eclíptica, el ecuador celeste y los dos polos celestes, el Polo Norte celeste y el Polo Sur.

ción en dos dimensiones del concepto de esfera armilar. En China se construyeron esferas armilares desde el siglo I a.C.; algunas tenían movimiento mediante ingeniosos mecanismos hidráulicos.

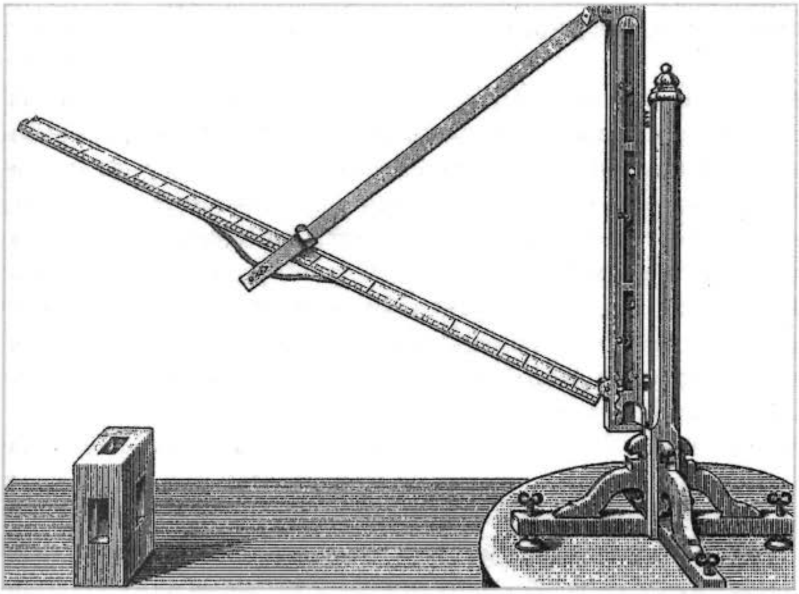
En esencia, la esfera armilar es un modelo de objetos estelares, con un conjunto de círculos, centrados en la Tierra, que representan las líneas de longitud y latitud celestes, así como otros detalles astronómicos de interés, como, por ejemplo, la eclíptica.

No debe confundirse una esfera armilar con un globo celeste. El segundo no es más que una representación de la bóveda estelar mostrando las posiciones aparentes de las estrellas en el cielo; el Sol, la Luna y los planetas se suprimen, debido a que sus posiciones cambian a mayor velocidad.

En cambio, la esfera armilar (ilustración superior derecha de la página anterior) es una estructura formada por un conjunto de anillos que representan los principales círculos imaginarios que se usan para describir los cielos. En la primera esfera armilar de la página anterior están representados: el ecuador celeste (A), la eclíptica (B), ambos trópicos, el de Cáncer (C) y el de Capricornio (D), ambos círculos polares (E y F, respectivamente), el coluro equinoccial (G) y el coluro solsticial (H).

Dentro de esas circunferencias hay un pequeño globo terráqueo con cada uno de sus polos alineados con el correspondiente polo celeste, formando un eje (ilustración inferior de la página anterior). Alrededor de este eje se puede rotar la Tierra para que un meridiano dado pueda coincidir con un meridiano celestial cualquiera. De esta manera, es posible hacer que la esfera interna se mueva para simular el movimiento de nuestro planeta o que se mueva la externa, simulando el movimiento de los cielos visto desde la Tierra. Ajustados los meridianos, y moviendo adecuadamente los elementos, es posible realizar medidas de posición apuntando hacia una estrella dada.

Por último, el triquetrum era un antiguo instrumento astronómico que se empleaba para determinar la distancia cenital o altura de los cuerpos celestes. Ptolomeo lo describió por primera vez, en su *Almagesto*, y lo llamó «instrumento paraláctico». Se tiene constancia de que Copérnico lo utilizó para medir el paralaje de la Luna, tema este del que se hablará con más detalle en un momento posterior.



El triquetrum de Copérnico, instrumento astronómico muy usado antes de la invención del telescopio. Copérnico lo menciona en su obra bajo el epígrafe *Instrumenti parallactici constructio.*

Este instrumento puede cumplir una función similar a la del astrolabio, pero fue diseñado para dar los grados con mayor exactitud, ya que su construcción es más sencilla. Consiste en un brazo vertical con una regla graduada y dos brazos pivotantes unidos por bisagras a ambos extremos, de los cuales el superior está dotado de una mira. Los dos brazos están unidos entre sus extremos de manera que estos se puedan deslizar. Cuando el observador alinea el objeto celeste con la mira del brazo superior, el brazo inferior cambia su ángulo. La lectura de la medida de la regla, en combinación con la altura vertical, da la distancia cenital. Fue un instrumento muy popular hasta que se difundió el telescopio de Huygens.

Más allá de que aprendiera a usarlos durante sus años en Cracovia, existe evidencia de que Copérnico empleó estos instrumentos a lo largo de su vida. Por ejemplo, usó la esfera armilar, el cuadrante, el sextante y el triquetrum, que aparecen expresamente mencionados en su obra capital, *De revolutionibus*. Por lógica, es casi seguro que también dispusiera de un astrolabio plano y quizá incluso de un cuadrante transportable.

TRASLADO A ITALIA

Entre tanto, mientras los dos hermanos Copérnico seguían sus cursos en la Academia de Cracovia, su tío Lucas había medrado significativamente, habiendo tomado posesión como obispo de Warmia en 1489. Fue él quien, enterado de la muerte de Jan Zanau, canónigo de Frombork, en 1495 solicitó el puesto para Nicolás y aconsejó a su sobrino que se dirigiera allí para presionar al cabildo, pese a que no había podido obtener todavía el título de *magister artium* (lo que no era extraño en la época). Sin embargo, esta estrategia no tuvo éxito. El cabildo temía la creciente influencia del poderoso obispo y rechazó la pretensión de Copérnico. Seguramente, el sabio aprovechó el viaje para volver a visitar su ciudad natal y, visto el fracaso de esta iniciativa, se incorporó a la corte de su tío en Olsztyn.

Pero el obispo Watzenrode había concebido planes muy definidos y ambiciosos para sus sobrinos. Al año siguiente, en el palacio del obispo en Lidzbark, tuvo lugar la elección de ministro plenipotenciario para representar, ante la Santa Sede, a las diócesis del norte de Polonia en su litigio con la Orden Teutónica. El elegido fue el secretario de Lucas Watzenrode, Jerzy Pranghe, quien fue enviado inmediatamente a Roma para realizar una serie de gestiones diplomáticas que se consideraban urgentes. El tío Lucas usó su influencia y Nicolás fue nombrado acompañante del enviado especial. No había logrado la canonjía, pero podría ampliar su formación en Italia, una manera de consolidar su currículo de cara a una ocasión futura. Para el espíritu inquieto de Nicolás, esta sería también la oportunidad de incrementar sus conocimientos y de aproximarse a las fuentes clásicas.

CAPÍTULO 2

La experiencia italiana

Italia era, a finales del siglo XV, la meca de artistas, científicos y pensadores. Las nuevas ideas, el patronazgo de los nobles y el aire de libertad que se respiraba atraían a lo más granado de estos colectivos de toda Europa. Para un científico como Copérnico, era el entorno ideal donde culminar sus estudios. Pero, para obtener una ayuda económica que le permitiera conseguir su sueño, debía compaginar el estudio de la astronomía con el de otras disciplinas más útiles, como el derecho o la medicina.

En 1496 Copérnico emprendió su primer viaje a Italia. Es de suponer que, tras los años de intenso estudio en Cracovia, la visita a Italia, cuna de las nuevas ideas renacentistas, tuvo que significar un importante estímulo para el joven. El país estaba atravesando una época muy convulsa, era un hervidero de conflictos armados entre los príncipes y repúblicas en que estaba dividido, complicándose aún más con las invasiones por las coronas de Francia y España, países que aspiraban a hacerse dueños de la península.

Italia vivía una crisis total de los valores que habían inspirado el oscurantismo medieval y los transformaba en todos los frentes. El espíritu crítico barría ideas preestablecidas y el pensamiento libre emergía como la manera de acercarse al conocimiento. La ciencia aparecía como un elemento transformador y habían surgido o estaban a punto de surgir nuevas visiones cuyo impacto sobre la sociedad europea iba a significar un cambio irreversible. La invención de la imprenta, la adopción de la brújula, la fundición de metales, el microscopio o el telescopio son ejemplos de logros importantes conseguidos o a punto de serlo. A ello hay que añadir la ampliación del mundo conocido, la confirmación de la esfericidad de la Tierra, el estudio de la circulación de la sangre y, cómo no, el modelo heliocéntrico que Copérnico incubaba ya en su mente.

En Italia existían en ese momento diez universidades. La de Bolonia, que era la más antigua, había sido fundada en el año 1088.

Estos centros universitarios serán el motor del cambio en mayor o menor medida, pero, en su conjunto, provocarán una ruptura trascendental.

Las relaciones entre Polonia y las universidades italianas datan del siglo XIII. En 1271, Mikolaj Polak fue elegido rector de la Universidad de Padua y Jan Polak lo será de la de Bolonia. Entre 1448 y 1471, cinco estudiosos polacos ocuparon cátedras de astronomía y matemáticas en la Universidad de Bolonia. La *lingua franca*, el latín, ayudaba por entonces a un intercambio fructífero del que se beneficiaban las instituciones de educación superior.

No es, por tanto, casual que Nicolás se dirigiera a Bolonia, donde ya había estudiado su tío y donde existía esa fuerte presencia de astrónomos y matemáticos polacos, algunos de los cuales enseñaron también en su propia *alma mater*, la Academia de Cracovia.

Copérnico permaneció en Italia un total de siete años, que significaron la continuación y el afianzamiento de su formación humanística y científica.

Se aproximó a las fuentes clásicas de la astronomía, por las que estaba tan interesado. Pero debió hacerlo, como sería una constante en su vida, compaginando ese interés con otros quehaceres muy diversos.

ESTUDIOS EN BOLONIA

Se conserva noticia escrita de que Nicolás Copérnico se matriculó en la Universidad de Bolonia, quedando registrado entre los alumnos de la llamada «nación alemana». Resulta curioso que quien pertenecía a una familia que tanto se había distinguido peleando contra el opresor teutón quedara encuadrado precisamente como perteneciente a esa nacionalidad. Pero este es un aspecto puramente administrativo. Parece como si, desde sus mismos orígenes, la parte negativa de las instituciones universitarias haya que encontrarla en la burocracia. La nacionalidad *alemana* englobaba a los estudiantes de procedencia centroeuropea.







FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Estudiantes universitarios en un fragmento del arca del famoso jurista italiano Giovanni da Legnano, que fue *utriusque iuris doctor* (doctor en ambos derechos: civil y canónico) por la Universidad de Bolonia. Copérnico estudió derecho en esta universidad para así tener una formación más «práctica» para su carrera profesional.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Sello de la Universidad de Bolonia, que presume de ser la más antigua de Europa, habiendo celebrado ya su noveno centenario.

FOTO INFERIOR:
Estudiantes pertenecientes a la *Natio Germanica Bononiae*, la «nación alemana» en la que Copérnico se matriculó.

No solo alemanes, sino también checos, belgas, polacos, húngaros, lituanos e incluso daneses y suecos. Este hecho seguramente refleja las aspiraciones germanas a la hegemonía sobre esos territorios al amparo del concepto de Sacro Imperio Romano Germánico, lo que sin duda no era bien recibido por los estudiantes de las otras nacionalidades incluidas.

El joven Nicolás siguió la voluntad de su tío y se inscribió en Derecho, facultad que tenía una gran raigambre en Bolonia. No es la opción que cabría esperar, pero seguramente la elección por parte de Watzenrode estaba inspirada en la idea de dotar a su sobrino de un perfil idóneo para que se incorporase a la administración eclesiástica.

En cualquier caso, se enroló en una facultad de Derecho donde Tomás de Aquino marcaba la orientación. La tradición enseñaba el sometimiento del derecho positivo al ordenamiento canónico, que siempre prevalecía en caso de oposición o conflicto. Sin embargo, la filtración de las nuevas ideas que retomaban la filosofía griega y el derecho romano iba minando poco a poco esa orientación tomística. En ese sentido, la nueva concepción del Estado como no sometido al poder eclesiástico iría ganando espacios en Bolonia, y luego lo seguiría haciendo con la obra de Maquiavelo, inspirada y amparada en la visión que los Borgia habían implementado en estos años.

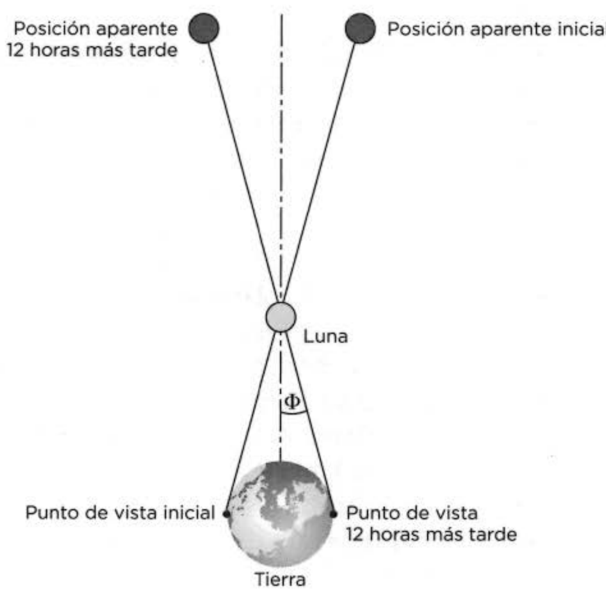
NOVARA, SU MAESTRO EN BOLONIA

Copérnico pasó cuatro años en la Universidad de Bolonia. Ciertas fuentes dan por hecho que se alojó en casa de Domenico Maria Novara, profesor de Astronomía y Astrología. Otras hablan de que alquiló una casa cerca de la iglesia de San Salvatore. Esto último viene avalado por su mayor disponibilidad de recursos económicos; sobre todo después de que el cabildo de Warmia le concediera el nombramiento de canónigo.

Su toma de posesión de ese importante puesto planteaba algunos problemas, dada su ausencia en Italia, lejos de Polonia.

PARALAJE LUNAR

Con el nombre de *paralaje* se designa el desplazamiento o diferencia en la posición aparente de un objeto observado desde dos puntos de vista distintos. Objetos cercanos tienen un paralaje mayor que otros más distantes del observador, por lo que esta medida se puede emplear para determinar distancias en la bóveda celeste. El *paralaje lunar* es el ángulo que tiene por vértice el centro lunar y abarca el radio ecuatorial de la Tierra. En el contexto de la crítica a Ptolomeo, el paralaje lunar tuvo gran importancia: permitió a Copérnico encontrar un error claro en las teorías del astrónomo alejandrino. Según Ptolomeo, la distancia de la Tierra a la Luna dependía de la fase en la que se encontrara esta última. Copérnico realizó diversas medidas a lo largo de su vida, demostrando que esa idea era falsa, ya que no encontró diferencias significativas. Se conocen las fechas y el lugar de varias medidas del paralaje lunar hechas por Copérnico: la primera fue la realizada con su profesor Novara en Bolonia en 1497. Una forma de medir el paralaje lunar desde un lugar consiste en aprovechar un eclipse lunar. Los primeros que usaron este procedimiento fueron Aristarco de Samos e Hiparco; este último lo empleó para determinar el tamaño del radio del Sol y de la Luna en relación con el de la Tierra.



Pero su poderoso pariente solventó esos problemas por medio de dos sustitutos, que fueron reconocidos por Copérnico en una ceremonia que tuvo lugar el día 20 de octubre de 1497 en el palacio episcopal de Bolonia.

«En Bolonia mi señor doctor, menos como alumno que como ayudante y testigo de las observaciones del muy docto varón Domenico Maria [...] llevaba sus apuntes con máxima exactitud.»

— *Narratio prima*, **Rheticus.**

Lo interesante, no obstante, es que el nuevo canónigo de Warmia, aunque estuviese matriculado en Derecho, pudo entregarse a los estudios de griego, que le permitieron acercarse a las fuentes que tanto le interesaban en sus textos originales. Pitágoras, Platón, Aristóteles o Ptolomeo pudieron así ser estudiados por él en profundidad.

Sin embargo, se alojara o no en su casa —como se ha afirmado tradicionalmente—, la persona decisiva para Nicolás en esa época fue Domenico Maria Novara, cuyos cursos siguió en la Universidad de Bolonia, donde Novara enseñaba desde 1479. Se trataba de un astrónomo muy influido por las teorías neoplatónicas y con una vocación observacional que debió de fascinar a Nicolás. Copérnico fue primero su alumno, para convertirse enseguida en su discípulo y luego en su colaborador.

Como fruto de ese trabajo conjunto, ambos llevaron a cabo mediciones en las que el astrónomo polaco se apoyaría posteriormente para construir su nueva teoría. Por ejemplo, el 9 de marzo de 1497, ambos hombres de ciencia realizaron una observación crucial. Esa noche la Luna eclipsó a Aldebarán, lo que permitió constatar que, en contra de lo predicho por Ptolomeo, la distancia entre la Tierra y la Luna no sufre prácticamente variación durante las fases de luna nueva y de plenilunio en relación a las fases de la segunda. En términos astronómicos, el paralaje (véase el recuadro de la página anterior) entre ambos astros no sufría variación.

LAS PRIMERAS IDEAS GEOCÉNTRICAS

De las ideas cosmológicas de Domenico Maria Novara no nos ha llegado mucho; pero no es probable que el maestro de Copérnico cuestionara el modelo ptolemaico, o más bien el geocentrismo imperante, acuñado por modificaciones sucesivas de los trabajos de Ptolomeo a lo largo de más de un milenio. Para el gran público, hablar hoy día de geocentrismo es referirse a una visión sumamente simplificada del problema: la Tierra, fija, en el centro, y los restantes astros describiendo circunferencias a su alrededor. Pero los modelos cosmológicos clásicos eran mucho más complejos que eso.

Ya hemos hablado de la cosmología de Aristóteles; como explicación de la realidad, tiene sin duda la ventaja de su simplicidad y de su concordancia aparente con lo que podemos apreciar a simple vista, sin otro aparato de medida que nuestros propios sentidos. La autoridad de Aristóteles y la consistencia de su modelo con la experiencia cotidiana, en lo que se refiere al movimiento observado de los astros, consolidaron el sistema aristotélico como base del pensamiento astronómico occidental durante siglos.

No obstante, la aplicación de las matemáticas, en particular de la trigonometría, y las observaciones cuidadosas de numerosos astrónomos, condujeron a intentar precisar más ese modelo, dotándolo de mejoras que contemplaran ciertos fenómenos que parecían contradecir algunos de sus detalles. Por ejemplo, la retrogradación de los planetas que se observa en todos ellos. Como se ve en la figura 1 de la página 63 para el caso de Marte, el movimiento de los planetas ocurre de este a oeste habitualmente, pero hay momentos en que el movimiento que se observa va de oeste a este. En dicha figura, las flechas de derecha a izquierda indican el movimiento normal y la flecha central, la retrogradación.

Eudoxo de Cnido (ca. 390-337 a.C.), un discípulo de Platón y de Arquitas de Tarento, elaboró una explicación matemática del modelo astronómico de Platón, suponiendo un movimiento circular uniforme en todos los fenómenos observables en el cielo. No se han conservado obras suyas, sino solo referencias a su trabajo, pero se le atribuye la introducción del concepto de *esfera celeste*, que dividió en grados de latitud y longitud.

Eudoxo parte de cinco principios fundamentales:

— La Tierra es el centro del universo.

— Todos los movimientos celestes son circulares.

— Todo movimiento celeste es regular.

— El centro de la trayectoria de cada movimiento celeste es el mismo que el centro de su movimiento.

— El centro de todo movimiento celeste es el centro del universo.

Desconocemos los fundamentos en que Eudoxo se basó para establecer esos principios, pero cabe suponer que existió una influencia directa de su condiscípulo Aristóteles y su concepción filosófica del cosmos. También debemos tener en cuenta el estado de las matemáticas en esa época, para las que sería mucho más simple suponer movimientos circulares y uniformes.

Para explicar el comportamiento de los astros, Eudoxo empleó un conjunto de esferas, sobre las que se mueven los cuerpos celestes, que, para él, son puntos. Las estrellas fijas, cuyo movimiento es circular y regular, están asociadas a una única esfera que rota diariamente alrededor de nuestro planeta.

Para cada uno de los restantes astros, cuyo movimiento aparente no es circular ni regular, Eudoxo supuso la existencia de esferas concéntricas anidadas. Tres esferas para el Sol, tres para la Luna y cuatro para cada uno de los planetas. Cada esfera anidada tiene sus polos conectados a la esfera que la contiene. Pero los ejes de cada esfera de un conjunto tienen una orientación distinta y cada esfera gira independientemente sobre su eje. Podemos ver un ejemplo de las esferas de un planeta y sus ejes de giro en la figura 2.

La esfera más exterior gira diariamente en sentido este-oeste respecto al ecuador celeste, con su eje orientado a los polos norte-sur. Su rotación tiene un período de un día sideral. La siguiente esfera tiene sus polos formando un ángulo de 24° con los de la

FIG. 1

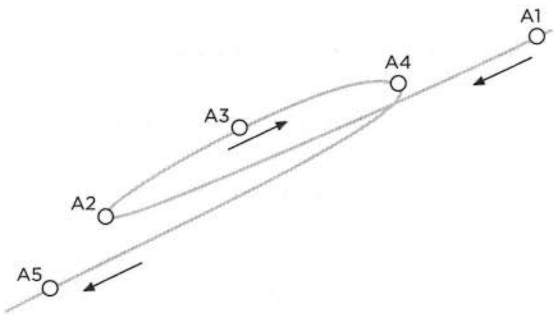
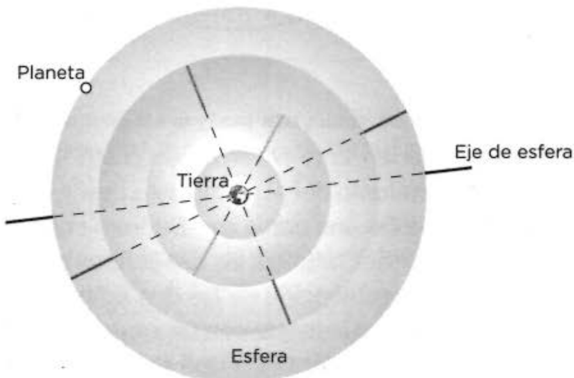


FIG. 2



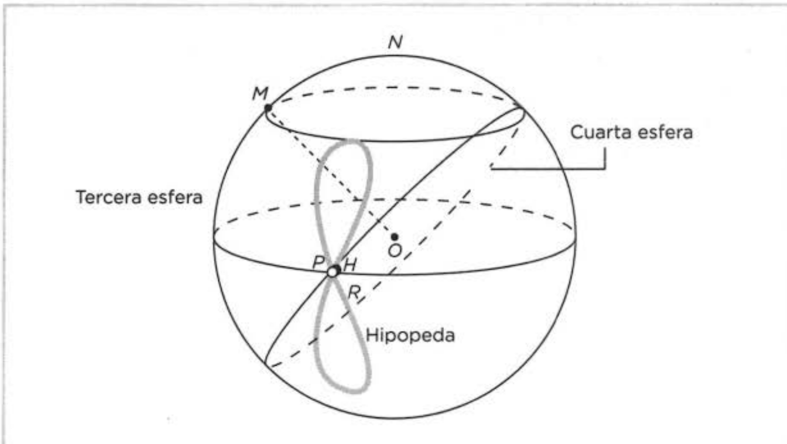
El dibujo superior muestra el movimiento retrógrado de Marte tal como podemos verlo desde la Tierra en ciertos momentos de su recorrido: al ir de A1 a A2 va de este a oeste, pero de A2 a A4 va de oeste a este; finalmente, de A4 a A5 vuelve a ir de este a oeste. Abajo, vista de las cuatro esferas celestes y de sus ejes de giro correspondientes, asociados por Eudoxo a cada planeta. La Tierra está fija en el centro; el planeta es el punto sobre la esfera exterior.

primera y gira de oeste a este. Su período de rotación es diferente para cada planeta: la Luna, un mes; el Sol, Mercurio y Venus, un año; Marte, dos años; Júpiter, doce años y Saturno, treinta.

Las dos esferas siguientes hacia dentro son las *esferas sinódicas*. La primera da una vuelta completa hasta que el planeta vuelve a aparecer en el mismo punto del cielo respecto del Sol, cuando se observa desde la Tierra, que es la definición de *período sinódico*. Sus polos están sobre la eclíptica y giran de sur a norte. Su período es de 110 días para Mercurio, 570 días para Venus, 260 días para Marte y unos 390 días para Júpiter y Saturno.

La última esfera, la más interna, rota con el mismo período que la anterior pero en sentido norte-sur.

El dibujo muestra las dos esferas interiores de Eudoxo. La Tierra sigue fija en el centro. El movimiento combinado de ambas esferas hace que el planeta describa una hipopeda, que es la curva en forma de lazo.



Estas dos esferas interiores se mueven de forma solidaria, de tal modo que el movimiento del planeta, visto desde el centro, ocupado por la Tierra, describe una curva que Eudoxo conocía bien: la *hipopeda*. La figura superior muestra las dos esferas interiores; el planeta es el punto P y la combinación de las dos esferas al moverse obliga al planeta a describir el lazo que corresponde a la curva en cuestión.

El modelo se completa con una tercera esfera para el Sol y una tercera para la Luna, cuyo eje está en la eclíptica y que explica el ligero movimiento N-S del astro sobre su propia órbita. Para Eudoxo, los astros se mueven sobre esferas concéntricas que se organizan en ocho grupos, uno para las estrellas fijas y uno más por cada planeta, el Sol y la Luna. Se considera así que Eudoxo fue el primero en explicar los movimientos retrógrados de los planetas.

Esta solución era brillante, si bien presentaba bastantes problemas, que debían de ser muy complejos con los conocimientos del siglo IV a.C. Incluso hoy, usando simulaciones por computador, no es fácil ajustar los parámetros del modelo para representar, aunque solamente sea de forma simplificada, los movimientos planetarios.

Aunque esta concepción parece demasiado elaborada, hay pruebas de que alguno de sus elementos llegó a ser utilizado a nivel práctico. El llamado «mecanismo de Anticitera», encontrado a principios del siglo XX en un pecio del siglo I a.C., era un calcu-

lador mecánico portátil que, entre otros cálculos, permitía computar posiciones astronómicas. Este instrumento ha sido estudiado ampliamente y, aunque de él solo quedan fragmentos, se sabe que permitía determinar los movimientos lunares basándose en el modelo de Hiparco, más tarde mencionado por Ptolomeo.

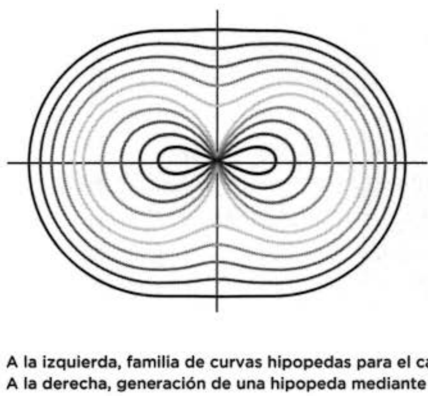
Una manera de adecuar las ideas geocéntricas a las mediciones astronómicas fue ir introduciendo más esferas con giros independientes. De este modo era posible modelar la mayoría de los movimientos observados del Sol y la Luna, así como los de los

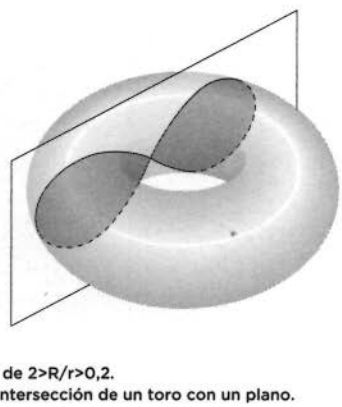
LA HIPOPEDA

Una hipopeda es una curva plana que puede generarse por la intersección de un toro y un plano, donde el plano es paralelo al eje del toro. Si el radio mayor del toro es R y el menor es r, entonces la curva resultante puede expresarse en coordenadas cartesianas como:

$$(x^2+y^2)^2 + 4r(r-R)(x^2+y^2) = 4r^2x^2.$$

Se trata de curvas algebraicas racionales bicirculares de grado 4 y simétricas respecto a sus dos ejes. El primer matemático del que tenemos constancia que estudió estas curvas fue Eudoxo. Ejemplos de hipopedas pueden verse en estas figuras:

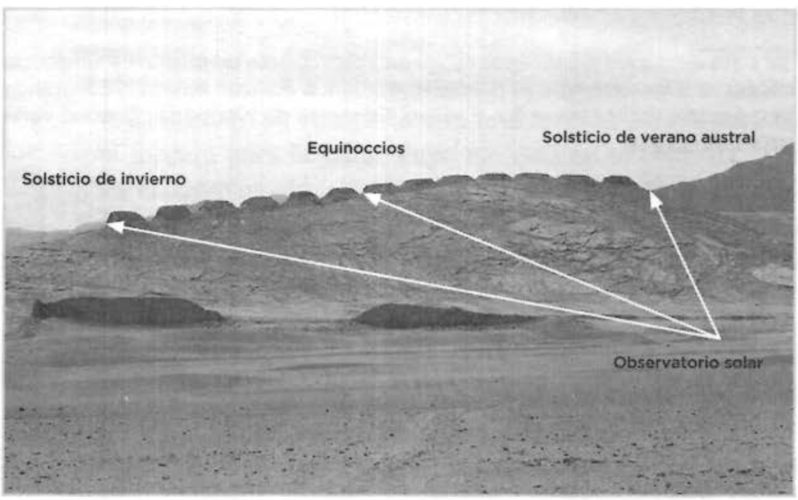




A la izquierda, familia de curvas hipopedas para el caso de 2>R/r>0,2.
A la derecha, generación de una hipopeda mediante la intersección de un toro con un plano.

MOVIMIENTO APARENTE DEL SOL

Sin duda, el Sol se reveló pronto al hombre como el astro más fácil de observar a simple vista. En apariencia recorre cada día diferentes semicírculos sobre la bóveda celeste. A lo largo del año, la curva diaria del Sol muestra una deriva que va de norte a sur y viceversa, según la estación del año. Sus posiciones más alejadas son conocidas como *solsticios* de verano e invierno. En el de invierno, el día es el más corto del año, mientras que en el de verano es el más largo. Entre ambos solsticios, la curva del Sol pasa dos veces por su máximo, que corresponde a los dos *equinoccios* (primavera y otoño); en esa fecha, el día y la noche tienen aproximadamente la misma duración. La evolución diaria de estos semicírculos es un indicador interesante. Culturas tan antiguas como la que construyó Stonehenge, en Inglaterra, o Chankillo, en Perú, usaron marcadores líticos para realizar dataciones a lo largo de un año. Pero ¿qué significa ese movimiento observado respecto al movimiento real del Sol? Este era el problema que se planteaba de cara a establecer una visión cosmológica consistente. Para Ptolomeo, influido por ideas filosóficas y por la aparente inmovilidad de nuestro planeta, eso se tradujo en el movimiento del Sol alrededor de la Tierra. De la observación del desplazamiento solar, la genialidad de este hombre le llevó a inferir un modelo de su movimiento celeste.



Arriba, ruinas de Chankillo, en Perú, que han sido interpretadas como un observatorio solar. Con sus más de dos mil años de antigüedad, se puede considerar el observatorio solar más antiguo de América.

planetas conocidos. Sin embargo, en esta concepción quedaban algunos flecos de difícil adecuación: se explicaban los movimientos retrógrados de los planetas en ciertas épocas del año, pero no sus cambios de brillo. Hasta la época de Ptolomeo no se hallaría una manera de incluir este hecho en el modelo.

Copérnico tuvo ocasión de consultar la bibliografía clásica que se conservaba en las bibliotecas de las universidades italianas en las que estudió. Su conocimiento del latín y del griego le resultaron muy útiles para analizarla, así como para consultar los comentarios y las revisiones y críticas que se habían publicado después de la invención de la imprenta. De esa forma entró en contacto y estudió en detalle los modelos celestes existentes, contrastando numerosos datos que obtuvo de las tablas astronómicas que tenía a su disposición. A eso hay que añadir los experimentos que realizó personalmente y que debieron ir dirigidos a la comprobación o refutación de algún detalle concreto de los modelos que estudiaba. En ese sentido, la experiencia práctica que consiguió al lado de Novara parece haber sido de importancia capital.

EL AÑO JUBILAR

Se considera probado que Nicolás pasó en Roma el año jubilar de 1500. Ese año hubo una gran afluencia de peregrinos, y puede que esa fuera la razón de su estancia en la capital romana. Sin embargo, tal vez fuese otro el motivo: se sabe que Novara enseñó matemáticas ese año en la Universidad de Roma, por lo que quizá Copérnico le acompañase para seguir su curso. Tal vez dedicara ese tiempo a curtirse en algunos detalles del derecho eclesiástico; pero en su *De revolutionibus* alude a un eclipse lunar observado allí por él el 6 de noviembre de 1500.

No obstante, los datos sobre este período en la vida de Copérnico son confusos y contradictorios. Según lo escrito por Rheticus en su *Narratio prima*, el de Torún habría aprovechado esta estancia en Roma para impartir un curso (o, al menos, algunas

charlas) en el que habría vertido sus primeras ideas heliocéntricas. Rheticus conoció al astrónomo polaco en sus momentos finales y, siendo hombre de ciencia y considerando la precisión de sus estudios científicos, merece cierto crédito. Aunque no se pueda confirmar ese curso, sí que es cierto que la Curia romana tenía formada una muy buena opinión de los conocimientos de Copérnico ya en los años finales de esa década y principios de la siguiente, lo que podría deberse a esas controvertidas conferencias romanas.

VUELTA A POLONIA

Sin haber concluido sus estudios, al año siguiente emprendió con su hermano el regreso a Polonia. Seguramente a instancias de su tío, debía volver para regularizar su situación como canónigo y conseguir un nuevo permiso de estudios que le permitiera doctorarse. Por ello se presentó en Warmia, ante el cabildo de Frombork, para solicitar esa autorización. Ambos hermanos la consiguieron. En el caso de Nicolás, tal vez fuese en parte por el hecho de que planteara seguir estudios de medicina. Esto puede desprenderse de la autorización que recibió, en la que se mencionaba expresamente el interés que podía tener para el cabildo contar entre sus miembros con un consejero médico.

Después de conseguir este nuevo permiso, los dos hermanos se encaminaron a Wroclaw, donde Nicolás se hizo cargo de la escolanía de la iglesia de la Santa Cruz, el segundo objetivo de esta rápida visita a Polonia.

Este viaje resultó muy accidentado. Los hermanos Copérnico abandonaron Italia en mayo de 1501. Se dirigieron a Torún, ciudad en la que se encontraron que el rey Juan Alberto I estaba preparando la defensa frente a la Orden Teutónica. Era un momento delicado, porque Polonia, junto a Bohemia, Hungría y Lituania, estaba organizando una campaña contra los turcos, que amenazaban sus fronteras por el sur. Precisamente en Torún le sorprendió la muerte al rey. El 17 de junio de 1501, pocos días después de que los

Copérnico abandonasen su ciudad natal, falleció Juan Alberto I. Se avecinaban tiempos convulsos para Polonia, pero Copérnico se libró de ellos gracias a su nueva licencia de estudios en Italia.

LOS ESTUDIOS DE MEDICINA

No sabemos las razones concretas, pero en ese momento tuvo lugar una ampliación significativa de su campo de interés. Por las razones que fueran, la medicina le pareció importante y decidió dedicar parte de su actividad a su estudio. Es posible que se tratara solo de otro consejo de su poderoso pariente; es posible que fuese una atracción por un conocimiento nuevo para él; y es posible que lo que le atrajera fuese la Universidad de Padua, que había sabido lograr un gran prestigio en ese campo y en la que podría proseguir también sus estudios de astronomía y griego.

En cualquier caso, Nicolás se incorporó a Padua en el otoño de 1501, permaneciendo allí por tres años. Se encontró con una medicina impregnada de la influencia de Hipócrates, Galeno y Avicena. Las enfermedades eran tratadas de una manera simplista, sin considerar una noción de sistema fisiológico. Aunque el cuerpo humano era oficialmente considerado como algo miserable y vil, siguiendo una visión consagrada oficialmente por la Iglesia, el naciente humanismo iba abriendo paso a una concepción diferente.

Por ejemplo, el papa Sixto IV (1471-1484) dictó una bula que autorizaba la disección anatómica de cadáveres. Tanto Bolonia como Padua habilitaron anfiteatros especiales donde los profesores impartían sus cursos mientras procedían a mostrar los cuerpos. Algo, sin duda, muy atractivo para un hombre de ciencia en cuya Universidad de origen los estudiantes debían contentarse con observar vísceras de animales.

Sin embargo, es poco probable que Copérnico participara en esas autopsias, ya que no estaban permitidas a los eclesiásticos. Seguramente tuvo que conformarse con el estudio de las enfermedades y los métodos para curarlas o aliviarlas. Se conserva el programa de estudios de la época, por lo que puede seguirse la

evolución académica del futuro médico. Así, en el primer curso se impartía, siguiendo los *Cánones de medicina* de Avicena, lo que podríamos llamar principios de medicina teórica. En segundo, se explicaban los *Aforismos* de Hipócrates, con comentarios de Galeno, junto con el *Libro de los pronósticos*, también de Hipócrates. En tercero era el turno del *Microtegmus* de Claudio Galeno.

«Sublimado vínico, al parecer bueno para el estómago [...]. Si Dios quiere, surtirá efecto.»

— **Escrito por Copérnico en el margen de uno de sus libros.**

Más allá de los cursos teóricos o de las enseñanzas prácticas de anatomía, los estudiantes tenían a su disposición el Giardino dei Medici, jardín botánico donde se cultivaban todo tipo de hierbas medicinales y se aprendía a reconocerlas y recolectarlas.

Releyendo sus notas, el de Torún parecía especialmente atraído por los remedios que se obtenían de tales hierbas. Escritas en los márgenes de sus libros, las notas contienen recetas prácticas, y a veces incluso destilan una fina ironía. Así ocurre con la nota destacada arriba, de la que él mismo parece dudar.

Puede constatarse que Copérnico acudía a las clases acompañado siempre por sus libros de astronomía. Su biblioteca personal se conserva actualmente en la Universidad de Uppsala, en Suecia, y en ella se encuentran diversas muestras de cómo escribía comentarios de medicina en sus textos de cosmología. Por ejemplo, en su ejemplar de las *Tablas alfonsíes* anotó: «Aparecen lombrices muy grandes antes de producirse lluvias moderadas». Esto quizá sea un indicativo de la relativa importancia que tenía para él la medicina.

En esta época continuó profundizando en su conocimiento de la lengua griega. Había centrado ya su interés en el *Almagesto* de Ptolomeo, pero quería leer todas las fuentes griegas originales que entonces estaban a su alcance. Primero necesitaba desentrañar todos los detalles de esta teoría, para más tarde estar en condiciones de refutarla. Solo se refuta bien lo que se conoce bien.





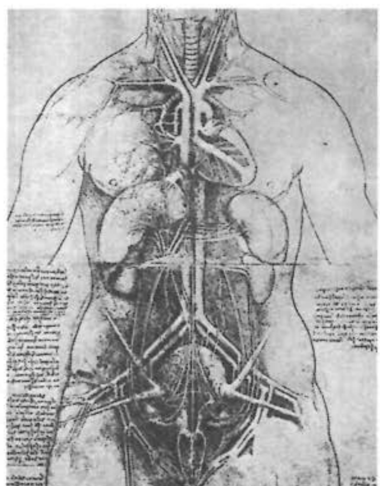
FOTO SUPERIOR:
En el año jubilar de 1500, Copérnico estuvo en Roma dando lecciones sobre matemáticas y astronomía. Se cree que entre su público estuvieron nada menos que su maestro Domenico Maria Novara, Leonardo da Vinci y el papa Alejandro VI..., aunque no todos al mismo tiempo.

FOTO INFERIOR:
Detalle de la portada de la gran obra de Vesalio sobre anatomía. Después del *horror sanguinis* («miedo a la sangre») de la Iglesia durante siglos, que impedía a los anatomistas diseccionar el cuerpo humano, finalmente estas prácticas fueron autorizadas con fines científicos durante el Renacimiento. Si el *De revolutionibus* de Copérnico revolucionó la astronomía, el *De humani corporis fabrica* de Vesalio hizo lo mismo con la anatomía humana. Ambas obras se publicaron en 1543... ¡un año memorable!

LA MEDICINA EN TIEMPOS DE COPÉRNICO

En los siglos XV y XVI, el Humanismo imperante en Italia también significó un drástico cambio en la medicina. La autorización eclesiástica para la disección de cadáveres y la aplicación del empirismo y el método científico a la anatomía fueron piezas clave de tal transformación. Fue la época de los grandes anatomistas: la evidencia experimental acabó con los errores anatómicos y fisiológicos de Galeno. Este gran médico griego había sido a la medicina lo mismo que Aristóteles a la física o a la astronomía: la autoridad suprema, indiscutible. Si Aristóteles o Galeno lo habían dicho, ya no hacía falta comprobarlo. Todo esto cambió con la Revolución científica en el siglo XVI: ya no había autoridades indiscutibles. Se debería someter todo a la observación y a la experimentación. Y así ocurriría también en el campo de la anatomía y de la fisiología. En 1543, el mismo año en que Copérnico publicó su *De revolutionibus*, Andrés Vesalio (1514-1564) daba a la luz su *De humani corporis fabrica,* un manual que sería un texto básico de anatomía hasta el siglo XX. Leonardo da Vinci publicó numerosas ilustraciones, a medio camino entre la anatomía y el arte, basándose en disecciones reales. Pero el gran descubrimiento anatómico y fisiológico de este período es el de la circulación menor de la sangre, que sería obra del español Miguel Servet (*Christianismi restitutio,* 1553) y del italiano Mateo Realdo Colombo (*De re anatomica*, 1559). Si Vesalio revolucionó la ciencia de la anatomía, Servet iniciaría un nuevo camino con la ciencia de la fisiología.





Frontispicio de la obra de Vesalio (izquierda) y dibujo anatómico de Leonardo da Vinci (derecha).

PTOLOMEO, EL BRILLANTE SISTEMATIZADOR

Sin duda, la lectura a la que Copérnico prestaba más atención era al *Almagesto*, el gran tratado de Claudio Ptolomeo (100-170). La importancia del libro (véase el recuadro de la página 75) reside tanto en las teorías de su autor sobre el cosmos como en sus contenidos sobre la obra —perdida— de Hiparco, el gran matemático y astrónomo alejandrino.

Claudio Ptolomeo, en el siglo II, encontró una brillante solución alternativa a la de Hiparco, que permitía explicar con mayor precisión los movimientos observados, incluyendo la retrogradación. Se basó en una idea que parece deberse a Apolonio de Pérgamo (ca. 260-ca.190 a.C.). Este, famoso por sus estudios sobre secciones cónicas, propuso un sistema para describir movimientos circulares que, puesto en práctica, resultó crucial para representar el movimiento de los cuerpos celestes.

La idea general hay que buscarla en el desarrollo de las curvas llamadas *epitrocoides* (véase el recuadro de la página 76). Se trata de curvas de revolución que permiten representar bucles de una forma relativamente simple; bucles como los que se apreciaban en las retrogradaciones de los diferentes planetas. Una manera elegante de trazar este tipo de curvas se basa en considerar dos circunferencias (figura 3). Sobre una de ellas se desliza el centro de la otra, que, a su vez, gira en el mismo sentido o en sentido contrario de la primera al considerar la curva descrita por un punto cualquiera del epiciclo. La curva de revolución que se obtiene resulta ser una epitrocoide.

Siguiendo esa idea, Ptolomeo postuló su modelo del universo suponiendo que los planetas se movían alrededor de la Tierra adosados a esferas, a las que llamó *epiciclos;* y estas, a su vez, tenían su centro móvil sobre las esferas principales, a las que llamó *deferentes*. De esta forma, adaptando el tamaño de los epiciclos consiguió explicar con mayor precisión los movimientos planetarios. En algunos casos, debió añadir otras esferas más pequeñas, los *epicicletos*, que se movían sobre los epiciclos. Las razones entre los radios de deferente y epiciclo determinan la forma concreta de la trayectoria resultante.

FIG. 3

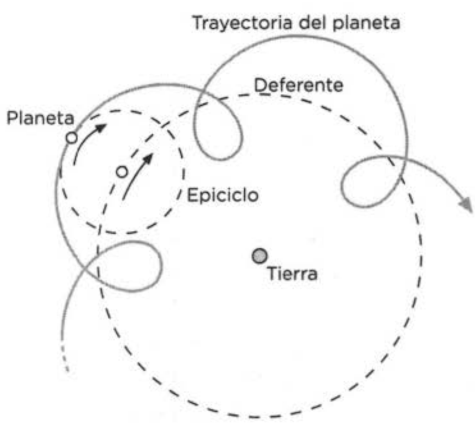
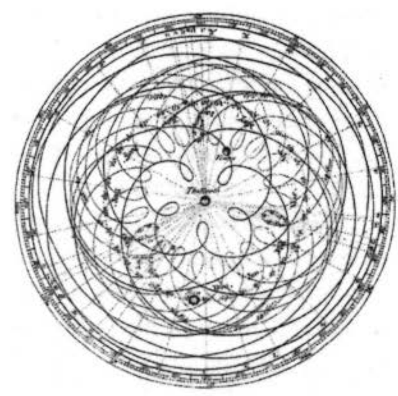


FIG. 4



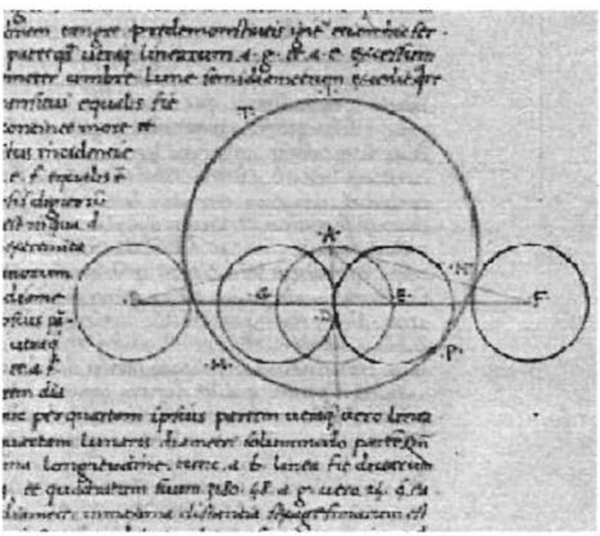
La figura 3 muestra la trayectoria epitrocoidal de un planeta, trazada usando el concepto de deferente-epiciclo. Este complejo e ingenioso sistema permitió durante siglos explicar el movimiento de los planetas, incluida la retrogradación. En la figura 4, trayectorias geocéntricas de los planetas interiores (Mercurio y Venus) a lo largo de varios años: Mercurio durante 7 años, y Venus durante 8. La complejidad era ya enorme.

Ptolomeo propuso un modelo cosmológico basado en 39 círculos. A lo largo de los años, sucesivas modificaciones del modelo ptolemaico fueron sugeridas por otros autores posteriores para corregir disparidades con las medidas experimentales observadas. Hay referencias que citan hasta 90 círculos, pero con un número de entre 50 y 60 parece posible representar los movimientos de los diferentes astros con la precisión de la que se disponía ya en tiempos de Copérnico. Un ejemplo de la enorme complejidad de este modelo lo podemos ver en la figura 4, en la que se han representado las trayectorias de Mercurio durante siete años y las de Venus durante ocho. El resultado es una auténtica maraña de trayectorias planetarias.

Pero, con el uso de sus epiciclos, Ptolomeo no podía explicar todos los detalles. Le quedaba pendiente incluir los cambios de brillo observados en los planetas a lo largo de su ciclo anual. Para ello, imaginó que, si bien todas las grandes esferas deferentes se movían en torno a nuestro planeta, su centro real era un punto externo a él, al que llamó *ecuante*. El Sol, la Luna y todos los planetas giraban sobre ese punto con velocidad uniforme y órbitas circulares. Al dotar de esa excentricidad a sus giros, los cuerpos

EL «ALMAGESTO»

El *Almagesto*, originalmente titulado *El gran tratado* o *Sintaxis matemática* y llamado por los árabes *al-majistī* (el más grande), fue escrito en el siglo II por Ptolomeo, natural de la región egipcia de la Tebaida, pero que vivió en Alejandría. Conocido tanto por sus modelos matemáticos del cosmos como por sus estudios de geografía, este libro es todavía la mejor fuente de información sobre la astronomía en la Grecia clásica, y fue texto de cabecera de muchos astrónomos en el mundo bizantino, islámico, medieval y renacentista. Para Copérnico sería un libro capital, que estudió minuciosamente; aunque su teoría heliocéntrica refutaba la de Ptolomeo, siempre mostró por él un gran aprecio. La obra está formada por trece libros. Según la edición de Venecia de Petrus Lichtenstein (1515), de la que Copérnico poseyó un ejemplar, el Libro I revisa la cosmología aristotélica. El II cubre problemas del movimiento diario de los objetos celestes. El III habla de la duración del año y el movimiento del Sol e introduce el concepto de epiciclo. Los Libros IV y V abordan el movimiento de la Luna, el paralaje lunar y los tamaños y distancias relativos del Sol y la Luna respecto a la Tierra. El VI se dedica a los eclipses solares y lunares. Los Libros VII y VIII abordan los movimientos de las estrellas fijas. Del IX al XI cubren los planetas observables a simple vista. El XII discute el movimiento estacionario y retrógrado de los planetas, y el XIII, las desviaciones del movimiento planetario respecto a la eclíptica.



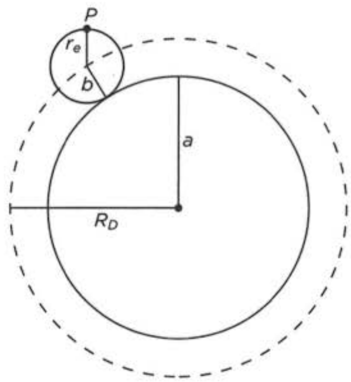
Fragmento de una página del *Almagesto*. En ella puede verse la generación de hipotrocoides usando técnicas gráficas.

celestes, incluida la Luna, no estaban a la misma distancia de la Tierra en cualquier punto de su recorrido. De ahí los cambios de brillo. De esta forma, el sistema ptolemaico no era *geocéntrico* en sentido estricto, como el de Aristóteles —la Tierra centro del universo—, sino simplemente *geostático* —la Tierra inmóvil y los planetas girando alrededor de su ecuante—.

UNA FAMILIA DE CURVAS DE INTERÉS ASTRONÓMICO

Las curvas de revolución y las relaciones trigonométricas han desempeñado frecuentemente un papel capital en el desarrollo de los modelos del cosmos. De particular interés es la familia de curvas de revolución que Ptolomeo empleó en su modelo geocéntrico y sobre las que en la actualidad tenemos un conocimiento más profundo. Se trata de las curvas conocidas como *epitrocoides*. El interés de estas curvas en astronomía radica en que son curvas de revolución, generadas por el movimiento de una circunferencia sobre otra. De hecho, el sistema deferente-epiciclo usado por Ptolomeo es un caso particular. Ptolomeo usó en la práctica un esquema como el de la figura aquí mostrada, que permite generar una epitrocoide en la que el radio del deferente es R_D y el radio del epiciclo es r_e. En este caso, la ecuación paramétrica de la epitrocoide resultante será:

$$x(\theta) = R_D \cos(\theta) - r_e \cos\left(\frac{R_D}{r_e}\theta\right);\ y(\theta) = R_D \operatorname{sen}(\theta) - r_e \operatorname{sen}\left(\frac{R_D}{r_e}\theta\right).$$



El sistema epiciclo-deferente para generar una epitrocoide. La circunferencia pequeña es el epiciclo (de radio r_e=b) y la circunferencia grande es el deferente (de radio a). Sobre la circunferencia punteada, de radio R_D=$a+b$, se mueve el centro del epiciclo. El punto P es el punto generador de la epitrocoide.

La figura 5 muestra el caso simplificado de un planeta en el que su deferente real está desplazado respecto al que debería corresponder en el caso geocéntrico. El planeta, debido a esa excentricidad en su recorrido, estará mucho más cerca de la Tierra cuando ocupe posiciones en la parte inferior de su deferente.

En el *Almagesto*, Ptolomeo analiza en detalle las órbitas de cada planeta, distinguiendo en su tratamiento los planetas exteriores y los interiores. Sobre unos y otros impone ciertas restricciones para explicar mejor sus respectivos comportamientos. En realidad, el sistema ptolemaico está constituido por un conjunto de artificios que, en buena medida, son independientes para cada cuerpo celeste. De hecho, cada uno tiene su propio ecuante, alrededor del cual gira, según puede verse en la figura 6.

Mercurio recibe un tratamiento más complejo que los otros planetas. En la figura 7 puede verse cómo Ptolomeo introduce un círculo adicional para desplazar el ecuante del planeta y generar una excentricidad añadida a su movimiento. En dicha figura se representa el Sol girando alrededor de su propio ecuante. La circunferencia adicional centrada en la Tierra

FIG. 5

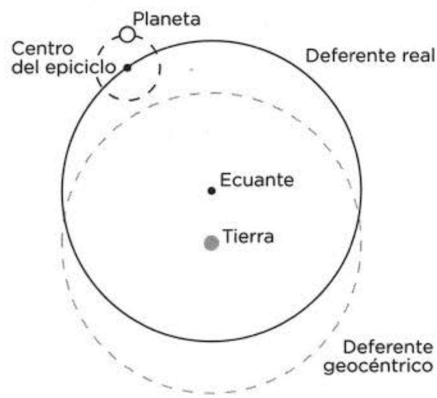


FIG. 6

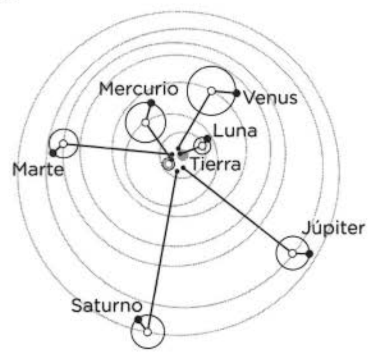
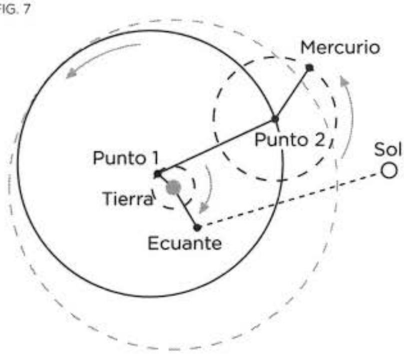


FIG. 7



POPULARIDAD DE PTOLOMEO

Las teorías de Claudio Ptolomeo serían ampliamente populares entre los astrónomos más diversos, tanto en el espacio (en distintas culturas) como en el tiempo (durante más de mil años). Un buen ejemplo de la popularidad de las teorías de Ptolomeo sería este detalle de un manuscrito medieval del siglo XIII, debido al astrónomo persa Qutb al-Din al-Shirazi. La imagen representa un modelo planetario basado en el sistema geocéntrico que había sido desarrollado por el autor del *Almagesto*.



permite el giro solidario de los puntos 1 y 2, de tal manera que el punto 2 genera el deferente de Mercurio. Sobre ese punto 2 se centra el epiciclo correspondiente. El Sol, en su recorrido, es tangente en un punto a la circunferencia discontinua cuyo centro es nuestro planeta.

Existen numerosos ejemplos de reelaboración, crítica o comentario de las ideas de Ptolomeo por astrónomos posteriores, sobre todo en el mundo musulmán y, en Europa, durante la Baja Edad Media. Merece destacarse, por su importancia y por la influencia que tuvieron sobre la obra de Copérnico, el trabajo de algunos astrónomos. Citaremos al árabe al-Haytham (965-1040), llamado Alhacén en Occidente, que fue apodado el «segundo Ptolomeo», quien comentó y amplió la obra de este último; a Johannes de Sacrobosco (ca. 1195-1256), que, en su *Tractatus de sphaera*, hizo una revisión del universo según Ptolomeo de fácil lectura; al persa Qutb al-Din al-Shirazi (1236-1311), que describió nuevos modelos para el movimiento de los planetas introduciendo mejoras en los principios ptolemaicos; y, sobre todo, a Georg von Peuerbach (1423-1461), que rescató el *Almagesto* de Ptolomeo y el *Sobre la configuración del*

mundo de Alhacén, actualizando los conceptos trigonométricos que manejaban. Peuerbach intentó conciliar los modelos de Eudoxo y Ptolomeo en su *Theoricae novae planetarum*, uno de los libros favoritos de Copérnico. Finalmente citaremos a Johannes Müller (1436-1476), conocido como Regiomontano y discípulo del anterior, que completó y publicó la obra de su maestro *Epytoma in Almagestum Ptolomei*, que tuvo un gran impacto en la astronomía de comienzos del siglo XVI.

UN DOCTORADO DE CONVENIENCIA

El tiempo transcurría y cada vez era más acuciante la necesidad de que Copérnico regresara a su país. Pero debía hacerlo con un título en el bolsillo, para demostrar que los esfuerzos económicos a los que había contribuido el cabildo de Frombork no habían sido en vano. Seguramente su propio tío le apremiaba a doctorarse y regresar. Sus planes respecto al sobrino lo requerían en Polonia y este debía llegar con la titulación más alta posible.

Pero había un problema importante. Para doctorarse en medicina, la Universidad de Padua exigía un doctorado previo en filosofía, una materia que el carácter pragmático de Nicolás le había hecho dejar de lado hacía ya tiempo. Tenía la alternativa de aprovechar sus estudios de Derecho en Bolonia para postularse allí como doctor. Pero hacía cuatro años que había perdido contacto también con esos temas. La solución fue muy simple. Acudir a una universidad como la de Ferrara, con menores requerimientos que la de Bolonia para titularse. Y elegir un título solo en derecho canónico, no en ambos derechos. A esto hay que añadir que los costes de la titulación eran mucho más baratos en Ferrara que en Bolonia o Padua.

Con esas premisas, Copérnico se dirigió a Ferrara en mayo de 1503 y allí, el 31 de mayo, realizó el examen con las solemnidades de rigor. La comisión examinadora, presidida por el vicario y profesor de Derecho Giorgio Prisciano, procedió al examen propiamente dicho sobre conocimientos específicos de la materia, la llamada *privata examinatio*. Dada por aprobada esta prueba, se

procedió a las formalidades públicas, la *publica examinatio*. Así se narró este acontecimiento, según la fórmula ritual pronunciada por su promotor, Antonio Leutus:

> El reverendo y muy sabio varón Nicolás Copernich de Prusia, canónigo de Warmia y escolástico de la Santa Cruz de Wroclaw, que cursara estudios en Bolonia y Padua, ha sido confirmado en Derecho canónico y doctorado por el presidente señor vicario.

Se acababan así los años de estudiante en Italia y comenzaba su enclaustramiento en Warmia; una vida de servicio al príncipe-obispo y a la Iglesia, de trabajo callado y eficiente en tareas administrativas y organizativas. Pero sobre todo, comenzaba una época de reflexión crítica sobre el problema que le mantenía ocupado desde hacía tanto tiempo. Incubaba algo más que la solución de una cuestión académica: estaba por dar a luz un modelo cuyo impacto sobre la ciencia moderna aún puede notarse.

A finales de 1503, Copérnico regresó a Cracovia, donde residió durante varios meses. Probablemente fue un período de reencuentro con viejas amistades y, sobre todo, de contactos dentro de su antigua *alma mater*.

Pero su tío lo reclamaba y Nicolás se trasladó al castillo de Lidzbark, residencia del obispo Watzenrode. A partir de ese momento y durante la década que le quedaba de vida al obispo, Copérnico estuvo a su lado, compartiendo su actividad política y ejerciendo la medicina. Seguramente sus aficiones astronómicas tuvieron que pasar a un segundo plano o, lo que es más probable, quedaron relegadas a una esfera oculta, a la que nuestro canónigo se debió entregar en sus horas libres y de manera reservada.

Prácticamente al empezar su actividad al lado de su tío, conoció la noticia de que su gran amigo y maestro Domenico Novara había muerto en Bolonia. Se cerraba una etapa.

CAPÍTULO 3

El giro copernicano

Afortunadamente para la ciencia, Copérnico supo compaginar sus tareas administrativas con una labor científica continuada y fructífera. Sin embargo, consciente del carácter revolucionario de sus logros, dudó durante mucho tiempo sobre si debía dar a conocer o no unos resultados que cambiarían el mundo, pero que también podrían significar la incomprensión y quizá incluso la condena tanto del colectivo de hombres de ciencia de su época como de la Iglesia a la que sirvió toda su vida.

La vida de Copérnico a partir de su regreso definitivo a Polonia se apartó mucho de lo que cabría esperar de un científico ocupado en resolver uno de los problemas más arduos y apasionantes que la ciencia se había planteado hasta ese momento.

En efecto, su posición como consejero del obispo Lucas Watzenrode le consumía en apariencia todo su tiempo. Volvió a su país en un momento de crisis política, con su tío ejerciendo un papel destacado en la gestión de los equilibrios que la situación requería. Copérnico se instaló en el castillo de Lidzbark, sede del obispo y lugar donde se concentraba el poder en Warmia.

En la corte obispal, Nicolás ocupó un lugar prominente como secretario y médico de su tío. En realidad, Watzenrode era más un príncipe que un obispo. Copérnico se convirtió en su hombre de confianza y comenzó a ejercer su representación en ceremonias públicas y compromisos sociales, viajando con frecuencia por toda Polonia. Así, en 1504, recién regresado de Italia, hay constancia de sendas visitas a Malbork y Elblag; ese mismo año asistió como representante de Warmia ante el Consejo de la Prusia Real, en reuniones celebradas en Gdansk y Torún. En 1506 y 1507, acudió a la Asamblea de los Estados prusianos, celebrada en Malbork y Elblag. No cabe duda de que su influyente y poderoso tío tenía designios políticos manifiestos para su sobrino.

UN HOMBRE POLIFACÉTICO

Aunque Copérnico no abandonó en ningún momento de su vida su actividad como astrónomo, hay otras tareas que distrajeron su atención. Así, por ejemplo, se tiene noticia de los trabajos cartográficos en los que se ocupó a partir del año 1510. Se le atribuyen diversos mapas significativos: en 1526 colaboró con el que está considerado como el padre de la cartografía polaca, Bernard Wapowski, en la confección de un mapa del reino de Polonia y el gran ducado de Lituania; igualmente, en 1529, por encargo del entonces obispo de Warmia, Maurycy Ferber, abordó con su colega Alexander Sculteti la realización de un mapa de los territorios prusianos. Por desgracia, no se ha conservado ninguno de estos mapas. Pero lo que más tiempo le ocupó fue su actividad como canónigo. Fueron múltiples las tareas administrativas que llevó a cabo por encargo del cabildo o de los sucesivos obispos de Warmia. En el período de 1510 a 1530 ejerció de inspector y canciller del cabildo y como administrador de las propiedades de este último. Dicha misión le obligó a realizar continuos viajes por Warmia y a desplegar una gran actividad para atraer a colonos que repoblaran las tierras capitulares: llegó a administrar unas 120 aldeas agrícolas. Aparte de su labor como economista, Copérnico tuvo que involucrarse también de forma muy activa en tareas diplomáticas, militares, médicas e incluso en algunas de carácter logístico. Quizá lo más curioso fue su interés por aspectos cotidianos como, por ejemplo, la elaboración del pan y la manera de atribuirle un precio justo. Lo destacable es que, pese a esa diversificación, mantuvo su interés por la astronomía y encontró tiempo que dedicarle.



Detalle de un mapa de Polonia elaborado por el cartógrafo polaco Bernard Wapowski, con quien colaboró Copérnico en 1526. Aunque no se conserva ningún mapa trazado por Copérnico, este nos puede dar una idea del nivel de la cartografía en aquel momento.

PRECURSORES DEL HELIOCENTRISMO

Cuando Copérnico se instaló en Lidzbark tenía ya desarrollado un primer embrión de su concepción del cosmos. Había leído mucho y estaba en el proceso de aceptar o rechazar los conceptos admitidos por la ciencia astronómica respecto a la estructura del universo. Pero él no fue el primero que se debatió entre colocar a la Tierra en un lugar preferencial o cedérselo al Sol.

Aunque la teoría geocéntrica —más bien, geostática— fue dominante en Occidente durante muchos siglos, hubo algunos estudiosos que se mostraron total o parcialmente contrarios a ella. Dejando aparte el caso de Aristarco de Samos, que formuló en el siglo III a.C. un modelo heliocéntrico cuyos detalles nos han llegado a través de Arquímedes (ca. 287-ca. 212 a.C.), hubo otros astrónomos que de una u otra manera se saltaron el guión del geocentrismo dominante y de una Tierra inmóvil.

Hicetas de Siracusa (siglo V a.C.) y Heráclides Póntico (siglo IV a.C.) creían que la Tierra rota sobre su eje, pero permanece en el centro del universo; el segundo de ellos también propuso que Mercurio y Venus giran alrededor del Sol.

Plutarco menciona a «los seguidores de Aristarco» de pasada. Del único del que tenemos noticias es de Seleuco de Seleucia, que enseñó alrededor del 150 a.C. Este astrónomo y filósofo helenístico consideraba que la Tierra gira sobre sí misma y alrededor del Sol, y defendía esta teoría mediante un modelo geométrico. Seleuco también fue el primero que propuso que el universo es infinito. No se han conservado sus escritos originales, solo se conoce un fragmento de su obra a través de una traducción al árabe, mencionado por el filósofo persa Muhammad ibn Zakariya al-Razi (865-925).

En la India hubo otros pensadores en esa línea. El más conocido, Aryabhata (476-550), en su obra *Aryabhatiya* (499), propuso un modelo en el que la Tierra giraba sobre su eje. Aunque se nota en él la influencia de Ptolomeo y consideraba que los restantes planetas dan vueltas en torno al nuestro, midió los períodos de aquellos respecto al Sol, lo que algunos identifican como un antecedente del heliocentrismo.

En Occidente hay que mencionar al escritor romano Marciano Capella (siglo V). Adepto al neoplatonismo y a favor de prácticas neopitagóricas, expresó la opinión de que Mercurio y Venus no giran alrededor de la Tierra sino del Sol.

El modelo geocéntrico fue aceptado de forma prácticamente unánime por los astrónomos árabes. No obstante, algunos cuestionaron ciertos aspectos del modelo. Por ejemplo, el astrónomo y matemático Ibn-Qurra (826-901), que trabajó en Bagdad y tradujo a Ptolomeo del griego; a él se le atribuye haber elaborado la teoría de la *trepidación* de los equinoccios, un movimiento que debería añadirse a la esfera de las estrellas fijas y que influyó en Copérnico.

Algo más tarde, el astrónomo de Basora, Alhacén (965-1040), escribió una detallada crítica del sistema de Ptolomeo en sus *Dudas sobre Ptolomeo* (ca. 1028). Posteriormente Alhacén, en su *Modelo de los movimientos* (ca. 1038), propuso que la Tierra rotaba sobre sí misma.

Por su parte, el cordobés Alpetragio (muerto en 1204) intentó eliminar los epiciclos y el ecuante, proponiendo un modelo que puede verse como una reformulación del de Eudoxo.

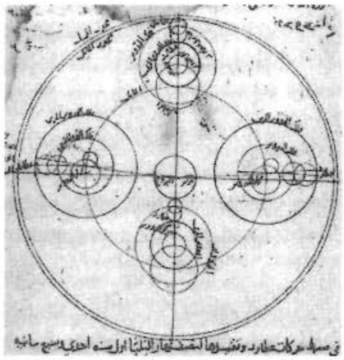
Al-Biruni o Alberonio (973-1048), nacido en el actual Uzbekistán, estudió la posibilidad de que la Tierra girase sobre sí misma y alrededor del Sol basándose en sus datos experimentales. Otros astrónomos del celebrado observatorio de Maragha, en Persia, también cuestionaron a Ptolomeo o perfeccionaron su modelo.

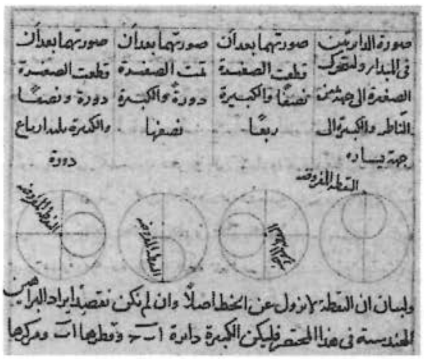
Al-Zarqali (1029-1087), llamado también Azarquiel, probablemente el más importante astrónomo andalusí, hizo correcciones al modelo de Ptolomeo; respecto al Sol, estableció que el centro de su deferente se movía sobre un círculo más pequeño y, en cuanto a Mercurio, determinó que su deferente era oval, lo que algunos han visto como una anticipación del modelo de Kepler.

Najm al-Din al-Qazwini al-Katibi (siglo XII), en *Hikmat al-'Ain*, escribió a favor del heliocentrismo, y Qutb al-Din al-Shirazi también analizó esa posibilidad. Mu'ayyad al-Din al-'Urdi (siglo XIII), que trabajó igualmente en Maragha, propuso el llamado *lema de Urdi*, que permite reemplazar un ecuante con un epiciclo equivalente, centrado en la mitad de la distancia al ecuante. El famoso astrónomo y matemático persa Nasir al-Din al-Tusi (1201-1274)

ASTRONOMÍA EN ÁRABE

El persa al-Tusi desarrolló un instrumento (abajo) que sería usado por varios astrónomos árabes, entre ellos al-Shatir. Añadiendo epiciclos, este gran astrónomo sirio eliminaría la necesidad de utilizar excéntricas y ecuantes, con lo que mejoraría el sistema ptolemaico.





A la izquierda, descripción del instrumento de al-Tusi. Arriba, modelo de la trayectoria de Mercurio elaborado por al-Shatir, usando dicho instrumento.

inventó un dispositivo que lleva su nombre y que permite que un círculo pequeño rote dentro de un círculo mayor de diámetro doble.

El astrónomo sirio Ibrahim Ibn al-Shatir (1304-1375), influenciado por la escuela de Maragha, desarrolló un modelo geocéntrico mucho más preciso que el ptolemaico y, sobre todo, más acorde con los datos experimentales de su época. En su obra *Kitab nihayat al-sulfi tashih al-usul* (*La búsqueda final de la rectificación de los principios*) reformó significativamente los modelos planetarios, eliminando la necesidad del ecuante mediante el uso del instrumento de al-Tusi para construir epiciclos. Ali Qushji (1403-1474), discípulo de Ulugh Beg en Samarcanda, además de plantear la necesidad de independizar filosofía y astronomía, proporcionó

evidencia empírica de la rotación de la Tierra en su obra *Sobre la supuesta dependencia de la astronomía respecto a la filosofía*.

El científico francés de origen alemán Nicolás de Oresme (ca. 1320-1382), en su *Traité du ciel et du monde*, discutió argumentos a favor y en contra de la rotación terrestre y del movimiento del Sol. Es interesante hacer notar que Copérnico conoció sus *Questiones de sphera*. Y el alemán Nicolás de Cusa (1401-1464) defendió en cosmología una postura contraria a la de Ptolomeo. Según él, no puede haber un lugar de privilegio en el universo. Tampoco hay quietud, sino que todo está en movimiento, incluido el Sol. Que no nos percatemos del movimiento no significa que no exista.

Kelallur Nilakantha Somayaji (1444-1544), de la escuela de Kerala, en la India, escribió *Aryabhatiya Bhasya*, un comentario al *Aryabhatiya* de Aryabhata; en él desarrolló un sistema de cálculo para un modelo planetario parcialmente heliocéntrico: según este modelo, los planetas orbitan alrededor del Sol y este, a su vez, orbita alrededor de la Tierra. En su libro *Tantrasangraha* revisó su modelo, determinando las órbitas de los planetas interiores con mayor precisión de lo que hicieran posteriormente Copérnico y Tycho Brahe.

Volviendo a Europa, en la Italia que transitaba del siglo XV al XVI hubo otros astrónomos que cuestionaron a Ptolomeo casi simultáneamente con el sabio polaco. Así, el científico y humanista italiano Celio Calcagnini (1479-1541) propuso de una manera difusa una teoría basada en la rotación de la Tierra y Girolamo Fracastoro (1478-1553) trató de volver, sin mucho éxito, a los orígenes del geocentrismo eliminando los epiciclos. Pero todos estos intentos tardíos quedaron oscurecidos por la revolución que se estaba gestando en la ciudad polaca de Frombork.

Se ha especulado sobre la posible influencia de estos pensadores sobre Copérnico. No cabe duda de que tuvo acceso a la mayoría de las ideas procedentes del mundo griego, latino y de la Europa medieval. Por otra parte, debió de conocer también la obra de Alhacén a través de Peuerbach.

Igualmente es seguro que tuvo acceso a las ideas de Capella, Azarquiel, Alberonio, Alpetragio e Ibn-Qurra, a los que cita expresamente en su obra.

PROBLEMAS DEL MODELO PTOLEMAICO

El problema al que se enfrentaba la astronomía en su intento por representar y predecir los movimientos de los cuerpos celestes podríamos resumirlo como un caso de interpolación esférica, es decir, determinar qué y cuántas curvas son necesarias para explicar los movimientos observados, suponiendo que un cierto astro —la Tierra para el modelo geocéntrico— ocupa una posición central.

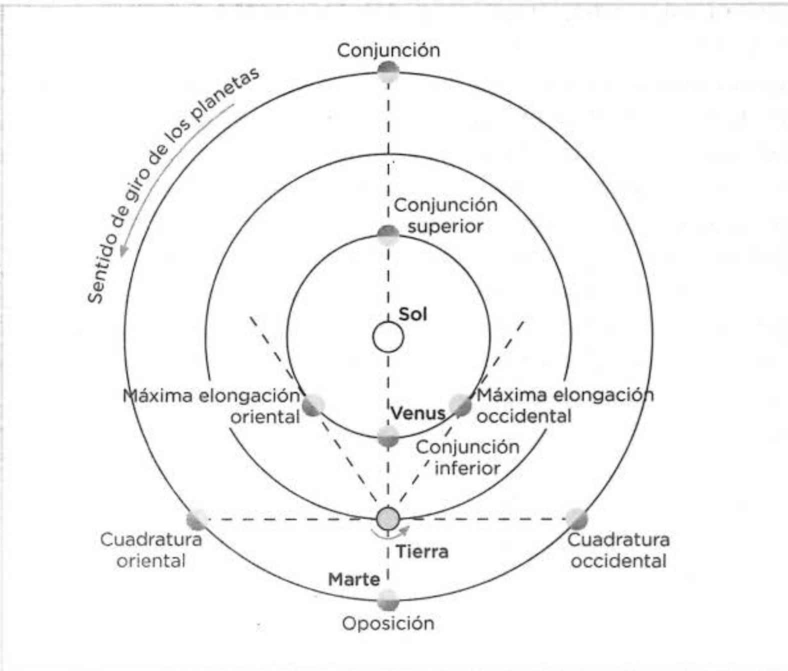
Desde casi dos mil años antes de que Copérnico se ocupara del tema, se había observado la falta de uniformidad en el movimiento de los planetas: aunque normalmente estos avanzan de este a oeste (en lo que se conoce como *movimiento directo*), durante ciertos lapsos de tiempo retroceden, desplazándose de oeste a este (en lo que se denomina *movimiento retrógrado*). Por eso no se podían utilizar órbitas simples —circunferencias o elipses, por ejemplo— para explicar las posiciones medidas.

Ya se han mencionado los dos modelos básicos de carácter geocéntrico que se manejaban: el de Eudoxo y el de Ptolomeo. Este último era el aceptado en los albores del Renacimiento, pero se consideraba un mero artificio matemático.

Para aproximarnos a la manera de abordar el problema por parte de Copérnico, debemos tener en cuenta, desde nuestra óptica, el movimiento retrógrado de los planetas en ciertas épocas del año. Obviamente, un simple giro circular en torno a un centro no puede explicar esa retrogradación si la Tierra ocupa el centro de nuestro sistema. Pero, para quien considera que es el Sol el que ocupa el centro y que la Tierra tiene una posición subordinada entre Venus y Marte, las cosas son diferentes.

En primer lugar, el comportamiento de los planetas no es el mismo, sino que, a simple vista, se observan dos tipos bien diferenciados. El que tienen Mercurio y Venus, a los que ya Ptolomeo llamó *planetas inferiores*, y el que exhiben los restantes planetas, a los que denominó *superiores*. Para comprender estas diferencias, interesa considerar nuestro actual modelo heliocéntrico. Prestemos atención a la figura de la página siguiente, donde hemos representado la Tierra, el Sol y un planeta de cada uno de los dos tipos mencionados. Un planeta «inferior» es, en nuestros térmi-

El dibujo muestra, en el modelo heliocéntrico, las órbitas de un planeta interior (Venus) y de uno exterior (Marte), así como sus situaciones respecto a la Tierra y al Sol.

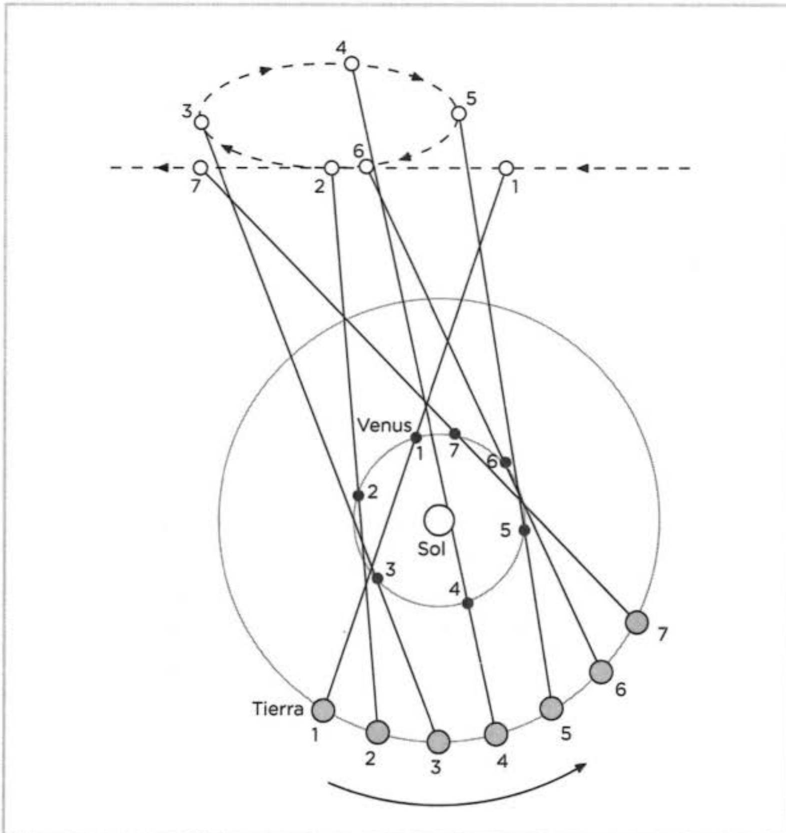


nos, «interior». Como vemos, un planeta de ese tipo no puede estar en cuadratura con la Tierra, sino que presenta una *elongación* (ángulo entre el Sol y un planeta visto desde la Tierra) máxima tanto por el este como por el oeste. En cambio, los planetas «superiores» —en la terminología actual, «exteriores» o «externos»— sí pueden ocupar una posición de *cuadratura* y cualquier ángulo a lo largo de su órbita. Es importante observar también que los planetas no giran de forma sincrónica; por el contrario, la duración de su período sinódico —el «año» de cada planeta— no es igual, lo que hace que se adelanten o retrasen respecto a la Tierra según el momento orbital en que se encuentren.

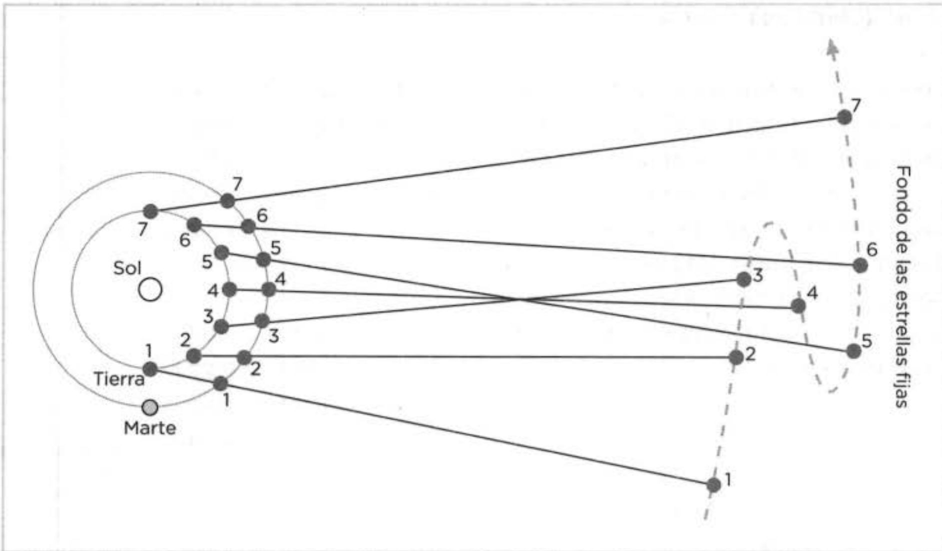
Por otra parte, *todos* los planetas estarán alineados con el Sol y la Tierra en un momento de su órbita. Distinguiremos dos situaciones diferentes, según se trate de planetas interiores o exteriores. Para los primeros, a su vez, pueden darse dos tipos de lo que llamamos *conjunción*, según se puede ver en la figura superior. En todos

ellos el Sol, la Tierra y el otro planeta están alineados, pero en un caso el planeta «tapa» al Sol y en el otro el Sol «tapa» al planeta. Para los planetas exteriores, en cambio, solo hay un tipo de conjunción, pero se da una situación que se conoce como *oposición*; en este último caso, es la Tierra la que se interpone entre el planeta y el Sol.

En esta página hemos representado diferentes posiciones de un planeta interior (como puede ser Venus) respecto al Sol y la Tierra. Cada punto representado en la órbita real del planeta se ha ubicado en su trayectoria aparente. Puede verse cómo entre los puntos 3 y 5 el movimiento que observamos es retrógrado, es decir, parece moverse en sentido opuesto al del resto de su trayectoria.



La parte inferior del dibujo muestra, en el modelo heliocéntrico, las órbitas de un planeta interior, Venus, y de la Tierra, mientras que la parte superior muestra el recorrido del planeta tal como se ve desde la Tierra, es decir, su trayectoria en el cielo.



El dibujo muestra, en el modelo heliocéntrico, las órbitas de un planeta exterior, Marte, y de la Tierra, marcando ciertos puntos de ambas trayectorias (1 a 7), así como su influencia sobre el recorrido del planeta tal como se ve desde la Tierra contra el fondo de las estrellas fijas.

En la figura superior hemos hecho lo propio con un planeta exterior (Marte en este caso), pero haciendo hincapié en las posiciones relativas entre la Tierra y dicho planeta. Vemos cómo, debido al menor radio de su órbita, parece que la Tierra «adelanta» a Marte.

En este caso también se observa un movimiento retrógrado; pero, como se ve en la figura, la trayectoria es distinta, a pesar de que aparece también como un bucle desde la perspectiva de la eclíptica.

Visto así, ya podemos entender con mayor facilidad de qué manera el hecho de ocupar la Tierra la posición excéntrica que conocemos simplifica la explicación de los comportamientos básicos de los diferentes planetas, según sean exteriores o interiores. Por supuesto, existen otros muchos detalles que inciden sobre las órbitas particulares de cada uno, sobre todo el hecho, descubierto por Kepler, de que las órbitas no sean circunferencias sino elipses. Por ejemplo, el caso de Mercurio, tradicionalmente complejo para todos los modelos, se explica por la gran excentricidad de la elipse que describe en su órbita.

EL «COMMENTARIOLUS»

A pesar de las múltiples misiones que le iba encargando el obispo Watzenrode, Copérnico supo ir más allá de su vida pública, ya que sus inquietudes miraban en otra dirección que no era una ambición política. Precisamente 1507 fue un año crucial para el astrónomo, quien aprovechó sus ratos libres y quizá horas arrancadas al sueño para pergeñar una obra que significaría el primer gran paso hacia su teoría heliocéntrica.

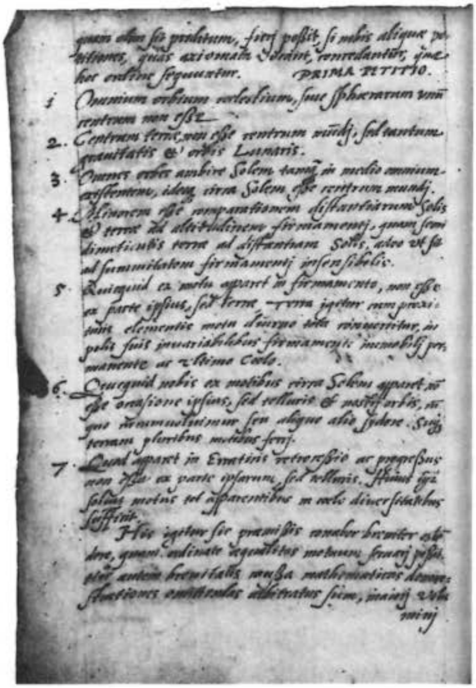
Se trataba de un pequeño tratado que hoy se conoce como *Commentariolus*.

No parecen claras las fuentes de las que el *Commentariolus* extrajo su información. La obra de Ptolomeo no estuvo directamente disponible en griego hasta que su *Sintaxis* o *Almagesto* se publicó en 1538, estando datada la primera traducción latina el 10 de enero de 1515. Probablemente utilizó como base el *Epitome*, que había sido impreso en Venecia en 1496, año en el que el astrónomo llegó a Italia.

Hay que entender el *Commentariolus* como un trabajo previo en el que aparecen algunos elementos que luego desarrolló con más amplitud, pero también donde hay disparidades con su visión definitiva de la cosmología. En esta obra no encontramos aún la estructura matemática de su posterior *De revolutionibus*, aunque no está exenta de desarrollos matemáticos, de los cuales un buen ejemplo es la introducción de un tercer movimiento de la Tierra al que dio el nombre de *declinación*; este nuevo movimiento lo justificó para mantener el eje terrestre paralelo a sí mismo durante la traslación del planeta, lo que le permitió dar cuenta de uno de los fenómenos que más se habían resistido al modelo geocéntrico: la precesión de los equinoccios.

El manuscrito es bastante breve, solo 40 páginas; está formado por una introducción, seguida de siete axiomas o postulados y varias secciones más. Los axiomas no deben tomarse en el sentido de ser autoevidentes, sino en el de que Copérnico basó sus conclusiones en ellos sin más explicación. Textualmente dice: «Tras atacar este muy difícil y casi insoluble problema, me vino a las mientes cómo podría ser resuelto con menores y más adecua-

UN ESQUEMA PREVIO



Segunda página manuscrita del *Commentariolus* de Copérnico, en la que se introducen los siete postulados básicos. Copia de Estocolmo.

El *Commentariolus* era un opúsculo de pocas páginas, que nunca llegó a publicarse en vida de Copérnico y del que se conservan solo tres copias. Su título, *De hypothesibus motuum coelestium a se constitutis commentariolus*, puede traducirse por *Breve exposición de las hipótesis acerca de los movimientos celestes.* Circularon varias copias entre los círculos científicos europeos, pero no llegó a publicarse hasta 1878. De su importancia da fe el hecho de que Tycho Brahe insertó un pasaje del *Commentariolus* en su libro *Astronomiae instauratae progymnasmata.* Según parece, la obra la obtuvo Brahe del médico del emperador Maximiliano II, Tadeas Hájek, a quien se la había donado al morir Rheticus, un discípulo tardío de Copérnico, como parte de su biblioteca. Brahe, a su vez, legó su copia a su colaborador Christian Sørensen (conocido como Longomontanus). Finalmente se perdió el rastro de la obra, hasta que en 1877 se encontró en la Biblioteca Imperial de Viena la copia de Longomontanus, que se usó como base para su edición. Aunque ha habido cierta polémica en torno a esta obrita porque ni la firmó ni la dató, se considera que 1507 es la primera fecha probable en la que el *Commentariolus* estuvo concluido y, desde luego, lo estuvo a más tardar en 1514. Esta última fecha viene determinada por un inventario realizado en la biblioteca de la Universidad de Cracovia. Esta datación tiene su importancia en tanto que algunos han querido ver en el *Commentariolus* una especie de esbozo de su obra capital, el *De revolutionibus,* comenzada a escribir mucho después. Sus célebres siete postulados se pueden ver en esta ilustración.

das construcciones que las que se conocen, si se me permiten algunos postulados». Estos postulados son:

1. No existe un centro único de todos los círculos o esferas celestes.

2. El centro de la Tierra no es el centro del universo, sino solo de la esfera de la Luna.

3. Todas las esferas giran alrededor del Sol, por lo cual este es el centro del mundo.

4. La distancia de la Tierra al Sol es imperceptible en comparación con la distancia al firmamento, por lo que las estrellas parecen fijas.

5. Cualquier movimiento que pueda aparecer en el firmamento no se debe a ningún movimiento de este, sino a la rotación de la Tierra alrededor de sus polos fijos, en un movimiento diario.

6. Los que se nos aparecen como movimientos del Sol no se deben a él mismo, sino que están ocasionados por el de la Tierra y nuestra esfera, con la que giramos alrededor del Sol como cualquier otro planeta, y así, la Tierra tiene varios movimientos.

7. Los movimientos observados en los planetas, ya sean de retrogradación o directos, no provienen de sus movimientos, sino del de la Tierra, y este basta por sí solo para explicar las aparentes irregularidades que en el cielo se observan.

Copérnico presentó aquí lo que podemos considerar un gran descubrimiento: el principio del movimiento terrestre. Con él explicaba los desplazamientos aparentes del Sol y de los planetas como determinados por el movimiento de la Tierra. Es el firmamento el que permanece inmóvil. Por vez primera, la razón niega lo que los sentidos nos dan como evidente; y lo refuta dando una

explicación consistente. Rompió con lo que para Aristóteles y Ptolomeo era un principio irrenunciable. Para ellos, la metafísica naturalista y la experiencia de los sentidos tenían que ser coincidentes: la Tierra estaba inmóvil en el cosmos, rodeada de astros en movimiento. Copérnico, esgrimiendo argumentos pitagóricos y neoplatónicos, utilizó su capacidad de raciocinio para librarse de un prejuicio. Y así concluyó que esa inmovilidad es solo aparente.

«Nuestros predecesores suponen, observo, un gran número de esferas celestes sobre todo para explicar el movimiento aparente de los planetas usando el principio de uniformidad.»

— Copérnico, Introducción al *Commentariolus*.

Los otros epígrafes del *Commentariolus* se titulaban así respectivamente: «El orden de las esferas», «Los movimientos aparentes del Sol», «Los movimientos uniformes no deben referirse a los equinoccios sino a las estrellas fijas», «La Luna», «Los tres planetas superiores: Saturno, Júpiter y Marte», «Venus» y «Mercurio». En ellos, el astrónomo polaco fue desarrollando, sobre la base de datos que no justificó, todo su nuevo sistema. Sin duda, el apartado capital es el breve texto sobre el orden de las esferas, donde despliega la esencia de su modelo:

> Las esferas celestes se abrazan unas a otras en el siguiente orden: la más alta es la esfera inmóvil de las estrellas fijas, que contiene y da posición a todas las cosas. Dentro está la [esfera] de Saturno, a la que sigue la de Júpiter, luego la de Marte. Por debajo de la de Marte está la esfera en que giramos; luego la de Venus y la última la de Mercurio. La esfera lunar, sin embargo, rota sobre el centro de la Tierra y se mueve con ella como un epiciclo. En ese mismo orden, una esfera sobrepasa a otra en la velocidad de revolución, según su mayor o menor expansión de ciclos. El período de Saturno termina en el año treintagésimo, el de Júpiter en el duodécimo, el de Marte en el tercero y el de la Tierra con la revolución anual. Venus completa su revolución en el mes noveno y Mercurio en el tercero.

Este párrafo es crucial para la historia de la astronomía. Copérnico intercambió las posiciones del Sol y la Tierra, simplemente; pero las consecuencias iban a ser imprevisibles al quebrar la esencia de la división aristotélica del universo. La Tierra era una más de las estrellas errantes (planetas), sin que haya razones para suponerla distinta a las otras.

En el resto del *Commentariolus* se analizan, una a una, las trayectorias aparentes de los planetas, el Sol y la Luna, y se reduce el número de círculos necesarios para explicar el movimiento de los cuerpos celestes. Frente a los más de sesenta círculos propuestos por los seguidores de Ptolomeo, Copérnico determina que solo son precisos treinta y cuatro. Dice:

> Mercurio sigue, pues, en general, siete círculos; Venus, cinco; la Tierra, tres, y la Luna, cuatro en su movimiento alrededor de aquella. Finalmente, Marte, Júpiter y Saturno se mueven, cada uno de ellos, sobre cinco círculos. Serán suficientes treinta y cuatro círculos para explicar toda la construcción del mundo y la danza completa de los planetas.

VELEIDADES POÉTICAS

En 1509, el mismo año en que Copérnico determinó el movimiento lunar y dos después de dar a conocer a un círculo de íntimos su *Commentariolus*, vio la luz el que sería su primer y único trabajo literario conocido: la traducción al latín de ochenta y cinco cartas escritas en griego por el historiador bizantino del siglo VII Teofilatto Simocatta. Se trata de cartas morales, bucólicas y amorosas, según Copérnico «tan puras que bien pudieran llamarse epístolas morales». Las publicó la imprenta de Jan Haller en Cracovia y fueron dedicadas a su tío, dejando constancia de que entre ellos no existía distanciamiento sino todo lo contrario:

> A vos, reverendísimo señor, dedico este modesto obsequio a pesar de no estar en relación alguna con los favores que de vos he recibido.

> Todo lo que soy capaz de producir con mi inteligencia y todo lo que pueda ser de utilidad, lo considero en justicia de vuestra propiedad. Sin duda es cierto lo que antaño Ovidio escribiera al emperador Germánico: «Según sea tu mirada, mi ánimo decae o se eleva».

El poeta renacentista Wawrzyniec Korwin, amigo de Copérnico y miembro de la Sodalitas Vistulana, escribió el prólogo de la obra. Se trataba de una composición en verso que tituló *Adiós a Prusia*, pues Korwin estaba en ese momento a punto de dejar Warmia para instalarse en Silesia.

Lo interesante de esta dedicatoria es que, pese a estar asociada a dichas *Epístolas*, se hace en ella una clara referencia al Copérnico astrónomo al señalar que el autor de la traducción «examina y describe los movimientos de la Luna, el Sol y las estrellas, al tiempo que los interpreta con sólidas bases». No cabe duda de que Nicolás era visto ya por quienes lo rodeaban no como un funcionario ni como un clérigo, sino fundamentalmente como un sabio.

Quizá llame la atención la aparente dualidad entre ciencia y arte que se dio en ese momento en la vida y la obra de Copérnico, pensando en ambas como en dos caminos muy apartados entre sí. Sin embargo, reflexionando sobre su obra como astrónomo, es dado pensar que, en el conjunto de esa obra, la estética desempeñó también un papel importante. La formulación que haría, años más tarde, de su nuevo modelo en *De revolutionibus* estaría impregnada de un evidente sentido estético.

UN FUNCIONARIO ACTIVO

En marzo de 1512 falleció Lucas Watzenrode, en Torún. Su sobrino no estuvo a su lado en los últimos momentos. Desde 1510 residía en Frombork, adonde se había desplazado quizá para poder dedicar más tiempo a sus aficiones astronómicas. Se especula con un cierto enfriamiento en las relaciones entre ambos parientes, pero no es algo que haya podido probarse de manera

fehaciente. Quizá el propio Copérnico, enfrentado a la decisión de proseguir su carrera política y luchar por suceder a su tío o bien retirarse y focalizar su atención en la astronomía, se decidió por lo segundo.

Ese mismo año de 1512, su hermano Andrés, que había tomado posesión como canónigo de Warmia en 1507, enfermó y fue apartado de su cargo. Corrían tiempos difíciles para la familia, que había perdido al que era su principal valedor desde que muriera el padre del astrónomo.

Pese a todo ello, no abandonó la ciencia que tanto lo atraía y dedicó esfuerzos incluso a las labores observacionales; se tiene constancia de que, en 1509, observó, tal vez desde Cracovia, un eclipse lunar, que le iba a permitir fijar el valor exacto del movimiento medio de la Luna. Más tarde, en octubre de 1511, está documentado que observó otro eclipse lunar desde el castillo de Lidzbark.

A la muerte de Lucas Watzenrode, el cabildo eligió como obispo a Fabian Luzjanski. Y este juró fidelidad al rey de Polonia, Segismundo I, en compañía de todo el cabildo, entre el que se encontraba Copérnico.

A pesar del cambio en el obispado, Nicolás continuó prestando sus servicios a la Iglesia hasta su muerte, manteniendo buenas relaciones con los sucesivos príncipes-obispos.

Hemos hablado de una hipotética elección definitiva de la astronomía en perjuicio de la política; sin embargo, eso es un tanto aventurado, sobre todo porque su labor como administrador siguió siendo intensa, principalmente en los dos decenios que van de 1510 a 1530. Los datos objetivos nos hablan de su dedicación, desde 1510, al capítulo de Warmia y a las asambleas de los Estados de la Prusia Real. En este período se vio obligado además a actuar como médico, atajando una epidemia, especialmente grave entre los campesinos, que amenazaba con diezmar Warmia.

En 1519 regresó a Frombork. Ese mismo año murió su hermano Andrés y estalló una nueva guerra entre la Prusia polaca y la Orden Teutónica, guerra que duraría hasta 1521. El obispado de Warmia sufrió las peores consecuencias y fue parcialmente

ocupado. Frombork se salvó, pero la mayoría del cabildo, incluido el astrónomo, tuvo que abandonar la ciudad y refugiarse en Olsztyn. En esta difícil tesitura, a Copérnico se le encomendó preparar la resistencia de la ciudad, mejorando las defensas del castillo.

A esta ofensiva siguió un alto el fuego que duró cuatro años. Enseguida, en junio de 1521, renunció a su posición de administrador del capítulo de Warmia, y regresó definitivamente a Frombork.

No fueron estas las únicas tareas administrativas de Copérnico; antes bien, preocupado por la delicada situación financiera de Prusia, que había obligado a acuñar moneda de plata de baja ley, Nicolás comenzó a ocuparse también de temas económicos.

COPÉRNICO, ECONOMISTA

Por encargo del obispo Luzjanski, Nicolás comenzó a estudiar una reforma monetaria que facilitase la integración económica de la Prusia Real en Polonia.

El problema era muy complejo, pues las ciudades de mayor importancia comercial habían ido emitiendo moneda con menor contenido de plata. Por otra parte, la Orden Teutónica también había hecho lo propio, usando monedas de menor valor que su facial, posiblemente como estrategia desestabilizadora; hasta el extremo de que, a partir de 1516, se empezó a considerar la posibilidad de acuñar una nueva moneda. En ese momento, existían cuatro cecas en la Prusia Real: en las ciudades de Torún, Gdansk, Elblag y Krolewiec.

Copérnico estudió las bases teóricas para determinar el valor de esa moneda. En este sentido, preparó un primer tratado, escrito en latín, que tituló *Meditata* (según otras fuentes, *De aestimatione monetae*, o sea, *Sobre el valor de la moneda*) fechado el 15 de agosto de 1517. En este pequeño tratado (siete páginas) diferenciaba entre el valor y el precio de la moneda. Formuló una ley muy interesante: cuando circulan en un país dos tipos de monedas, ambas de curso legal, y una de ellas es considerada por el

público como «buena» y la otra como «mala», la mala pone fuera de circulación a la buena; ello se debe a que los ciudadanos prefieren ahorrar esta última y no usarla como medio de pago. Esta ley, tenida en mucha consideración por los economistas modernos, fue atribuida con posterioridad al financiero inglés Thomas Gresham (1519-1579), y hoy día se la conoce como «Ley de Copérnico-Gresham».

Sin embargo, este tratado no tuvo repercusión, debido a los cambios políticos en Prusia, especialmente la creación del ducado de Prusia (la Prusia Ducal, regida por el antiguo gran maestre de la Orden Teutónica) y la muerte del obispo, que fue sucedido por Maurycy Ferber. Seguramente el nuevo obispo influyó en Nicolás para que elaborase un segundo tratado que incluyera las relaciones entre ambas Prusias y la corona polaca. Este nuevo trabajo se publicó como libro en latín, titulado *Monetae cudendae ratio (Sobre la acuñación de la moneda)*, en la primera mitad de 1527. Contenía una teoría monetaria general con consideraciones sobre cómo la devaluación de la moneda es una de las principales causas de la ruina de un país.

Añadió un pasaje en el que estableció que la relación entre el valor facial de las monedas de oro y plata debería ser idéntico al precio del oro y la plata puros. Al final de este trabajo detallaba los principios de la reforma monetaria que, según él, debería afectar a la Prusia Ducal y a la Prusia Real. Como solución a este problema, Copérnico proponía cerrar todas las cecas en ambas Prusias y sustituirlas por una única, que produjera moneda para las dos y que debería llevar el símbolo de Prusia y la corona real polaca. Esta precisaría de la aprobación del rey y, como ventaja, su moneda sería aceptada en toda Polonia, lo que resultaba muy conveniente para el comercio mutuo. Copérnico era de la opinión de que la moneda antigua debería sacarse de la circulación cuando comenzase a circular la nueva. Por supuesto, aconsejaba que la nueva moneda prusiana se ajustara a la polaca y proponía para ello un valor de cambio.

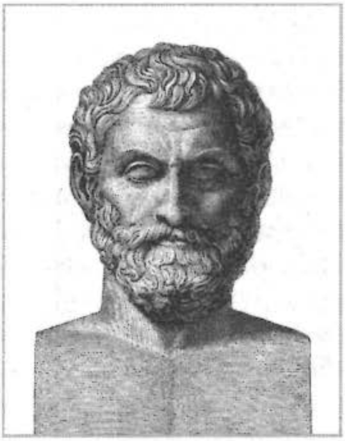
Es interesante dejar constancia del aprecio que investigadores modernos en el ámbito monetario y económico han mostrado por estas ideas del sabio torunés, cuya aproximación al problema

¿ASTRÓNOMOS... O ECONOMISTAS?

Con frecuencia pensamos en los astrónomos como el arquetipo del sabio despistado, que se ocupa de los astros celestes y se olvida de los problemas terrestres. ¿Eran realmente así de despistados los grandes astrónomos? No, en absoluto. Y, para muestra, he aquí tres ejemplos excelsos.

Tales de Mileto

El «padre de la filosofía» y uno de los Siete Sabios de la Grecia antigua fue también un gran astrónomo, capaz incluso de predecir un eclipse. Se cuenta de él que, una noche, de tanto mirar al cielo se olvidó de mirar al suelo... y se cayó en un pozo, para escarnio de su esclava tracia. Pero, precisamente por tanto mirar al cielo, supo prever que aquel año habría una magnífica cosecha de aceitunas, por lo que alquiló todas las almazaras de la región y, cuando llegó la cosecha, todos los aceituneros tuvieron que contratarle a él sus prensas para moler las aceitunas... ¡al precio que Tales les impuso! Es el primer monopolio de la historia.



es considerada como irreprochablemente científica. Podemos ver en ello la amplitud de miras de este gran hombre de ciencia, su manera uniforme de abordar todos los problemas que se le plantearon, sin importar el campo del que venían, y su conocimiento de la esencia y función de la moneda posiblemente debido a sus antecedentes familiares. Por otra parte, subyace su vocación política, seguramente heredada de su tío, sobre la necesidad de aproximar ambas partes de Prusia al reino de Polonia.

Sus esfuerzos fueron parcialmente vanos ante las presiones políticas del ducado y de las grandes ciudades, sobre todo Gdansk y Torún. Pero lo importante estaba conseguido: el sistema monetario prusiano quedaba sujeto al ajuste dentro de Polonia, significando el hecho una auténtica unión monetaria.

Copérnico
También Copérnico, como Tales, se ocupó de temas económicos, llegando a estudiar la reforma monetaria que permitiese la integración económica en su país. Estudió cómo determinar el valor de las monedas, y supo diferenciar ya entre el valor y el precio de las mismas. Escribió varios tratados sobre el tema y se anticipó a la ley Gresham, hoy llamada «Ley de Copérnico-Gresham».



Newton
La propia *Encyclopaedia Britannica* califica a Newton de genio de las finanzas: creó varios elementos clave del sistema público de finanzas de Inglaterra. Fue nombrado primero director y luego, en 1699, intendente de la Casa de la Moneda (la famosa Royal Mint, la ceca de Inglaterra), con un sueldazo de cientos de libras esterlinas al año... y, encima, algo todavía más importante: ¡un porcentaje de cada moneda acuñada! Entre un concepto y otro, en los casi treinta años al frente de la Royal Mint llegaría a ganar más de 2000 libras esterlinas al año, en promedio. A la sarcástica criada tracia de Tales se le habría congelado la risa en la boca.

UN ASTRÓNOMO INCANSABLE

Hay pruebas concretas de que Copérnico mantuvo un incesante trabajo en este ámbito económico, que compaginó con sus otras tareas. De hecho, este fue el período más intenso de su vida científica: en él terminó de perfilar y redactó su modelo heliocéntrico.

Existen evidencias, algunas ya mencionadas en este capítulo y todas ellas citadas en el *De revolutionibus*, de que observó un eclipse parcial de Luna en Cracovia en el mes de junio de 1509 (capítulo XIII del Libro IV), un eclipse total también de Luna en Frombork en la noche del 6 de octubre del mismo año (capítulo V del Libro IV) y la conjunción de Marte con la estrella más brillante de la constelación de Libra en enero de 1512 (capítulo XIX

del Libro V). A esas observaciones hay que añadir que, tras instalarse en Frombork, adecuó un espacio para sus observaciones astronómicas.

«Todas las esferas giran alrededor del Sol, pues es el centro del mundo [...]. Los que se nos aparecen como movimientos del Sol no se deben a él mismo, sino que están ocasionados por el de la Tierra y nuestra esfera, con la que giramos alrededor del Sol como cualquier otro planeta, y así, la Tierra tiene varios movimientos.»

— *De revolutionibus*, Copérnico.

Igualmente, entre los años 1518 y 1521, durante su estancia en el castillo de Olsztyn, se hizo traer algunos instrumentos astronómicos: un triquetrum (instrumento paraláctico) y un astrolabio. Además, en un muro vecino al claustro, en la galería septentrional, justo a la entrada de su habitación, hizo construir un cuadrante solar de reflexión para determinar el tiempo de los equinoccios. Todavía hoy, cuando se visita el castillo, puede verse el dibujo de la escala de dicho instrumento. Se trata de un aparato cuya invención se le atribuye al sabio torunés.

En Frombork existe todavía una torre, lindante con el antiguo edificio de la curia canónica, que se conoce popularmente como «torre de Copérnico», aunque no parece que fuera ese el lugar elegido por el astrónomo para su observatorio. Según se cree, Copérnico lo construyó sobre una losa en su jardín. Sobre ella elevó un cuadrante solar de madera para realizar sus comprobaciones y medidas. Durante el asedio de la ciudad por los caballeros teutónicos fue destruido y no volvió a ser levantado.

Durante esa primera época en Frombork, Copérnico fue invitado a participar en la reforma del calendario juliano. Se trataba de un antiguo proyecto acuñado desde hacía más de un siglo y sometido a deliberación en los concilios de Constanza (1414-1418), Basilea (1431-1445) y V de Letrán (1512-1517). Sin embargo, no sería hasta décadas después, muerto ya Copérnico, cuando se llevaría a buen término.

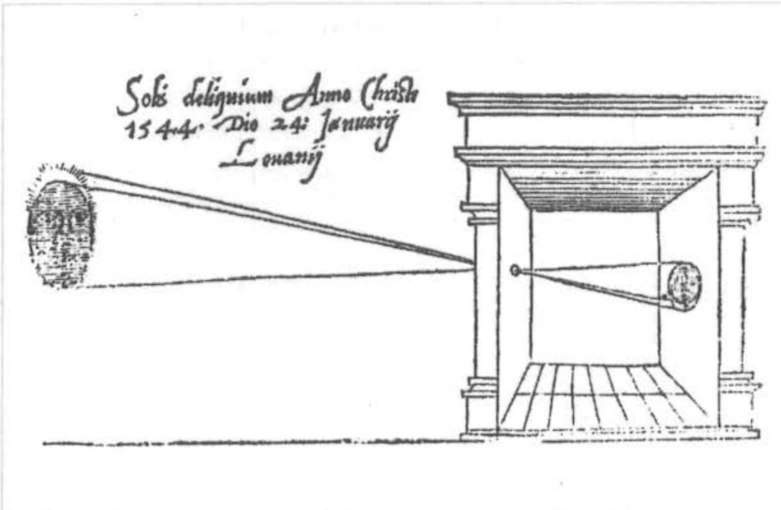


FOTO SUPERIOR:
Esquema del cuadrante solar que Copérnico mandó construir en el castillo de Olsztyn para sus observaciones astronómicas, con una inscripción latina del 24 de enero de 1544.

FOTO INFERIOR:
Pared del castillo de Olsztyn, cerca de la habitación de Copérnico. En ella se observa lo que queda de la escala que el astrónomo polaco hizo dibujar para su cuadrante solar.



En 1513, el obispo de Fossombrone, Pablo de Middelburg, escribió a Copérnico en ese sentido, indicándole que se hacía urgente estudiar un cambio. Pablo de Middelburg había recibido del V Concilio de Letrán el encargo de presidir una comisión que recabara información respecto a la reforma del calendario y la estaba allegando desde distintas fuentes a lo largo y ancho de Europa.

«Y en el centro de todo se encuentra el Sol. Pues ¿quién en este bellísimo templo pondría esta lámpara en otro lugar mejor, desde el que pudiera iluminar todo?»

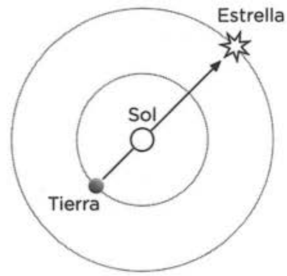
— *De revolutionibus*, Copérnico.

Copérnico emitió su opinión empleando sus propias mediciones del año solar y la envió a Roma, adonde rehusó acudir personalmente. Middelburg incluyó las opiniones de Nicolás en su tratado *Paulina*, aunque olvidó mencionar al autor. Sin embargo, en 1516, en su *Secundum compendium correctionis calendarii*, presentado al papa León X, el astrónomo polaco aparece como uno de los investigadores del problema. No se han conservado los detalles del proyecto, pero, a tenor de algunos comentarios vertidos en el prefacio a su *De revolutionibus*, parece que Copérnico opinaba que era prematuro emprender la reforma del calendario, debido a que aún no se había podido determinar la duración del año solar con suficiente precisión.

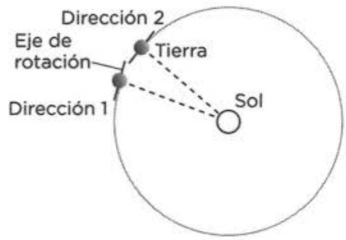
Es interesante la fecha de esos contactos entre el obispo de Fossombrone y Copérnico, porque es una confirmación indirecta de que, por entonces, debían de circular ya copias del *Commentariolus* por los círculos científicos europeos; seguramente eso fue lo que llevó a la Curia a incluir el nombre del astrónomo polaco entre los consultados. En dicho opúsculo, Copérnico planteaba que el problema de la precisión en la medida del año se debía a la consideración de que los años *trópico* y *sidéreo* tenían igual duración, sin tener en cuenta la precesión de los equinoccios.

En relación con esto, se conoce una serie de observaciones hechas por Copérnico en Frombork en 1515, que parece haber

LA DURACIÓN DEL AÑO



Año sidéreo



Año trópico

Existen diversas maneras de medir el año. El *año sidéreo* o *sideral* es el tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos de nuestro planeta por un mismo punto de su órbita, medido con referencia a las estrellas. Corresponde a 365 días, 6 horas, 9 minutos y 9,7632 segundos. En cambio, el *año trópico* o *tropical* es el tiempo invertido por la Tierra en dar una vuelta completa alrededor del astro rey. Su duración, medida en las mismas unidades —día solar medio o día civil— es de 365 días, 5 h, 48 m y 45,19 s, o sea, algo menor que el año sideral. En el *Almagesto,* Ptolomeo nos da la duración del año según Hiparco, estableciéndola en 365 días, 5 h, 53 m y 20 s; Ptolomeo realiza esa medición, dando un valor de 365 días, 5 h, 53 m y 12 s. Numerosos astrónomos posteriores dieron a conocer valores en torno a esas mediciones. Copérnico, en su *De revolutionibus,* establece la suya: 365 días, 5 h, 46 m y 23 s. Posteriormente, al llevar a cabo la reforma del calendario, algunos años después de la muerte de Copérnico, se fijó la duración del año finalmente en 365 días, 5 h, 49 m y 12 s. (Si el eje de rotación de la Tierra apuntara siempre en la misma dirección, no habría diferencia entre la duración del año tropical y la del año sideral.)

estado dirigida a determinar esa diferencia. Dichas medidas forman parte del Libro III del *De revolutionibus*, al tratar, precisamente, de los equinoccios y del movimiento aparente del Sol.

Respecto a los instrumentos de que disponía en Frombork, Nicolás describe varios en el *De revolutionibus:* una esfera armilar (capítulo XIV, Libro II), usada para observar las estrellas; un cuadrante (capítulo II, Libro II), para establecer la altitud máxima

diaria del Sol; y un triquetrum (capítulo XV; Libro IV), empleado en medidas de paralaje, del que detalla su construcción. Además, en el capítulo X del Libro I, alude a un tipo de sextante que ha de utilizarse para llevar a cabo las medidas que cita sobre Marte en las proximidades de su conjunción.

En ese año de 1515, estando en Frombork, comenzaría a escribir su obra fundamental. Al trasladarse a Olsztyn, a pesar de sus muchas labores de diversa índole, continuó sin pausa con su redacción. Fue allí donde concluyó el primer volumen en 1519.

A partir de ese momento, Nicolás Copérnico fue terminando, tomo a tomo, su gran obra *De revolutionibus*. Se trataba de una tarea difícil si tenemos en cuenta la gran actividad desplegada por él entre los años 1520 y 1530 en el cumplimiento de sus funciones como canónigo. Fueron muy importantes para él el apoyo y los ánimos de Tiedemann Giese, canónigo de Warmia y que posteriormente, tras la muerte de Copérnico, llegaría a ser obispo de dicha diócesis. Se cree que entre ambos existía algún parentesco, y se habían frecuentado durante la estancia de Copérnico en Roma en el año jubilar.

Sin embargo, basta leer sus palabras sobre astronomía en la introducción para comprender el entusiasmo de Copérnico por su trabajo y por la ciencia que tanto le apasionaba:

> Entre las numerosas y diversas artes y ciencias que despiertan nuestra afición y sirven de alimento a las mentes humanas, conviene dedicarse sobre todo, según mi parecer, a las que [...] se cuentan entre las más bellas y dignas de conocimiento y que se ocupan de las maravillosas revoluciones y trayectorias de los astros del universo, de sus tamaños y distancias, de sus salidas y puestas, y también de las causas de todos los fenómenos del cielo, que, finalmente, explican todo el sistema del mundo. Pues ¿hay acaso algo más hermoso que este cielo que abarca todo lo bello?

No parece que alguien tan entusiasta precisara de un apoyo externo para entregarse a resolver un problema que le apasionaba; ni siquiera teniendo que atender a tantos aspectos diferentes como los que le exigían sus labores eclesiales y administrativas.

El *De revolutionibus* describía con detalle los movimientos aparentes y reales del Sol, la Tierra, la Luna y los planetas, analizando las órbitas planetarias y modelando las anomalías que se observan en su trayectoria.

Este trabajo tuvo que representar una ardua tarea para Copérnico, que con frecuencia se vio obligado a retocar sus propias anotaciones en función de los datos empíricos de que disponía y, sobre todo, debido a la minuciosa revisión de sus propios cálculos. En ningún otro punto de su obra resume mejor este hecho que cuando dice estas palabras:

> Yo me pregunté durante mucho tiempo si debía dar a luz mis comentarios [...] o, por el contrario, no sería mejor seguir el ejemplo de los pitagóricos y algunos otros, que tenían la costumbre de no transmitir los misterios de la filosofía nada más que a sus amigos y sus próximos, y esto no por escrito, sino solo oralmente.

Con todo, pese a esos titubeos que dan idea de su conflicto interior, en 1530 la obra estaba terminada. Al principio constaba de siete libros, pero luego fue reducida a seis al incluir el que inicialmente era segundo libro en el primero.

LA CARTA CONTRA WERNER

Otra distracción, aunque más relacionada con su trabajo científico, se la proporcionó uno de sus colegas en la Universidad de Cracovia y amigo de la época romana, Bernard Wapowski, quien le envió en 1524 un tratado escrito por Johannes Werner, astrónomo de Núremberg. Bajo el título *De motu octauae sphaerae*, Werner atacaba los métodos de cálculo y los conocimientos de ciertos astrónomos clásicos.

Aunque Werner había fallecido en el año 1522, y pese al comedimiento que le caracterizaba, Copérnico contestó a Wapowski con una carta, la famosa *Carta contra Werner*, que constituye un pequeño tratado de astronomía y en la que se refutaban firme-

mente las opiniones del astrónomo alemán. Era una misiva privada, en un tono duro, pero Wapowski consideró que contenía material tan interesante que merecía ser distribuida en círculos científicos.

Se trataba de una carta de diez páginas, que incluía aspectos muy esclarecedores de su visión sobre la astronomía. Estaba dirigida a su amigo y futuro obispo de Warmia, Bernard Wapowski. La introducción es muy significativa:

> Frombork, 3 de junio de 1524
>
> Al reverendo Bernard Wapowski, Cantor y Canónigo de la Iglesia de Cracovia, Secretario de Su Real Majestad el rey de Polonia, y mi más altamente estimado patrón, saludos de Nicolás Copérnico.
> Hace algún tiempo, mi querido Bernard, me envió un pequeño tratado sobre *El movimiento de la octava esfera* [...]. Su Reverencia decía que ese trabajo era muy apreciado y me pedía darle mi opinión sobre él.

En ese primer párrafo, Copérnico ya hace toda una declaración de intenciones:

> Intentaré demostrar tan claramente como sea posible en qué yerra en relación con la esfera de las estrellas fijas y mantiene una tan incompetente posición.

Comienza declarando que la medida del tiempo que hace Werner es incorrecta. Luego entra en materia, tachando de error la principal afirmación de Werner, es decir, que 400 años antes de Ptolomeo el movimiento de las estrellas fijas no era uniforme.

El de Torún se explaya contra Werner, negándole autoridad para criticar los métodos de astrónomos como Aristilo, Timocaris, Agripa o el propio Ptolomeo. Se pregunta si Werner no confunde movimiento «uniforme» con movimiento «promedio».

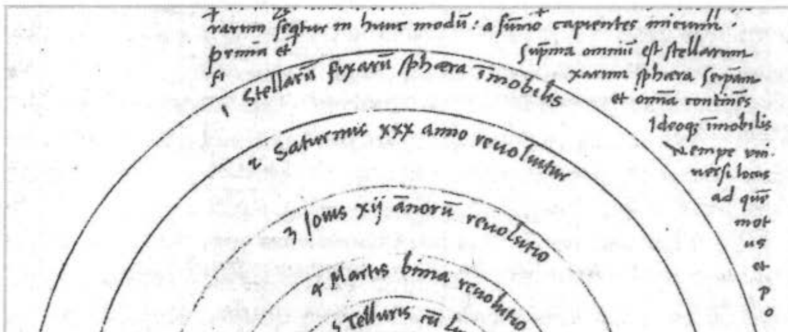
El párrafo más demoledor es el que empieza:

> Finalmente, en ninguna parte es más absurdo nuestro autor que en su Proposición 22 y especialmente en su Corolario.



REVERENDO DOMINO BERNhardo Vapowski Cantori et Canonico Eccle Cracovien &
S. R. Maiestatis Poloniae Secretario Nicolaus Copernicus.





varum sequitur in hunc modũ: a summo capientes initium.
prima et
supma omniũ est stellarum
fixarũ sphæra
1 Stellarũ fixarũ sphæra immobilis
sui et omnia continens
ideoq; immobilis
Nempe uni-
versi locus
ad quẽ
mot
us
et
p
o
2 Saturnus XXX anno revoluitur
3 Iovis xij anorũ revolutio
4 Martis bima revolutio
5 Telluris cũ Luna an. re.
6 Veneris nonimestris
7 Merc. XXC dierũ
Sol
si
tio
ce-
terorũ
omniũ
syderum
conferatur
Nam quod
aliquo modo illã
etiã mutari existimat
aliqui:
nos aliã, cur ita appareat
in deductione motus terrestris assignabimus causam. Sequit

FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Primera página de la famosa *Carta contra Werner*, dirigida por Copérnico a Bernard Wapowski en 1524.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
El cardenal Von Schönberg, que escribió esto a Copérnico: «Me he enterado de que usted ha escrito una exposición de todo el sistema astronómico, para la mayor admiración de todos. Le ruego encarecidamente que comunique su descubrimiento a sus colegas y me envíe una copia de ello a mí lo antes posible».

FOTO INFERIOR:
Página 18 del manuscrito original del *De revolutionibus*, que se conserva en la biblioteca de la Universidad Jagellónica de Cracovia, nombre actual de la antigua Academia de Cracovia. Se ve ya el Sol en el centro de todo el sistema y la Tierra en la tercera órbita, tras la de Mercurio y la de Venus. Se ha de tener en cuenta que, en latín, Tierra se decía *Tellus* (genitivo *Telluris*).

Copérnico se está refiriendo a un supuesto error por defecto que Werner atribuye a una medida reportada por Timocaris respecto a dos estrellas. Y Copérnico acaba excusándose por no profundizar más en su carta:

> Por último, ¿qué pienso sobre el movimiento de la esfera de las estrellas fijas? Como mis opiniones han de ser declaradas en alguna otra parte, me parece superfluo e impropio extenderme en esta comunicación. Ya que esto basta para satisfacer vuestro deseo de tener mi opinión sobre este trabajo, dando cumplimiento a vuestra petición. Deseo que Vuestra Reverencia tenga la mejor salud.

Hay dos elementos muy interesantes en esta misiva. El primero, que desliza que piensa publicar su «opinión» sobre cosmología «en alguna otra parte». El segundo, la agresividad con la que, en contra de sus habituales maneras tan mesuradas, trató a Werner; ello quizá pueda ser visto como que le había irritado la forma tan superficial de este al atacar a unos sabios que él, Copérnico, llevaba décadas estudiando cuidadosamente.

En contraste con sus restantes escritos, en esta carta abundan las citas a Aristóteles. Resulta especialmente interesante una frase que condensa el espíritu y la esencia de esta epístola, por lo que significa en relación a su propia obra:

> Deberíamos estar agradecidos no solo a los filósofos que han hablado correctamente, sino también a todos aquellos que lo han hecho con incorrección, porque el hombre que desea alcanzar el camino correcto adquiere frecuentemente no poca ventaja conociendo los caminos erróneos.

LOS ÚLTIMOS AÑOS

Durante los años finales de su vida, Copérnico fue reduciendo su participación en la vida política de la Prusia Real, puede que a consecuencia de la edad. No se retiró de la vida pública, pero la restrin-

SOMBRAS SOBRE SU VIDA PRIVADA

Poco, por no decir nada, se sabe de muchos aspectos de la vida privada de Copérnico. Ni siquiera ha quedado constancia de que recibiese las órdenes mayores de la Iglesia. Pero, sin duda, el problema más espinoso de su vida personal está ligado al caso de su ama de llaves, Anna Schilling. Sobre esta mujer y su vinculación a Nicolás hay diversas teorías. Según una de ellas, parece ser que hacia el año 1537 Anna se alojaba en casa del astrónomo y canónigo, en la ciudad de Frombork. El obispo Dantiscus le dirigió a este dos «amonestaciones paternales» pidiéndole que la hiciese salir de su hogar. Copérnico contestó:



Carta de respuesta de Copérnico a una requisitoria del obispo Dantiscus respecto al ama de llaves del astrónomo.

> Recibo de vuestra Reverendísima Señoría esta paternal y más que paternal admonición, que siento en lo más profundo de mí [...]. Aunque quise hacer lo que me requería, no es fácil encontrar una pariente femenina adecuada, y por tanto intento terminar este asunto para las vacaciones de Pascua Florida.

Anna debía de ser unos 15 años más joven que el astrónomo, aunque no era ninguna jovencita cuando se trasladó a vivir en su casa; seguramente frisaba los 47 o 48 años. Probablemente, Dantiscus se hizo eco de colegas envidiosos de Copérnico que pudieron haber hecho una interpretación maliciosa de la presencia en su casa de la mujer.

gió al ámbito de Warmia y allí llevó a cabo funciones administrativas cada vez menos complejas, en general en el papel de supervisor. Sin embargo, pese a que a partir de 1530 su actividad fue decreciendo, no dejó de estar involucrado en sus tareas como canónigo.

Entre tanto, la fama de su libro aún no publicado se fue propagando por los círculos científicos. Johann Albrecht Widmannstetter, académico alemán que ocupaba el cargo de secretario del papa Clemente VII, ofreció en 1533 una serie de conferencias en

Roma en las que presentó los fundamentos de la teoría copernicana. Impresionado por esta presentación, el arzobispo de Capua, cardenal Nikolaus von Schönberg, se puso en contacto epistolar en 1536 con Copérnico. En su primera misiva le expresaba su admiración por sus conocimientos sobre los astrónomos clásicos y por la nueva cosmología que había formulado. Le urgía a detallar sus descubrimientos a otros estudiosos del tema y le pedía que le hiciera llegar sus escritos. Algo similar hizo Tiedemann Giese, obispo de Chelmno y, como sabemos, amigo personal del astrónomo torunés.

Desde que en 1523 hubiera sido nombrado obispo de Warmia su viejo conocido Maurycy Ferber, su posición siempre fue de cierto privilegio como persona de confianza del príncipe-obispo. Tras fallecer Ferber en el año 1537, Copérnico fue uno de los candidatos que el cabildo presentó al rey. Sin embargo, la elección recayó en el favorito del monarca, Jan Dantyszek, más conocido como Dantiscus.

El nuevo obispo había mostrado toda su vida ciertas veleidades científicas y había pretendido en repetidas ocasiones trabar amistad con Copérnico. Sin embargo, el astrónomo de Torún había respondido con frialdad a sus cartas, como puede constatarse en la correspondencia que se conserva. Al asumir el poder, este distanciamiento entre ambos debió de pasarle factura a Nicolás y pudo haber sido causa de un feo asunto personal que ensombreció la tranquila vida del canónigo en sus últimos días.

UN LIBRO EN EL LIMBO

Con su obra capital ya terminada y las noticias nebulosas que circulaban sobre ella, es dado preguntarse: ¿a qué esperaba Copérnico para darla a la imprenta? ¿Qué le infundía dudas o temor? Podemos conjeturar que existían dos tipos de razones que le refrenaban. Unas, sin duda, eran de orden científico. ¡Cómo una teoría aceptada por tantos astrónomos podía ser refutada por un oscuro canónigo recluido en Frombork, en los confines de Europa!

El otro conjunto de reparos tendría un origen filosófico e incluso teológico. Al haber estado tan vinculada la teoría geocéntrica con una visión muy estructurada y relacionada con principios aparentemente inmutables, sus dudas debieron de corresponder a auténticos prejuicios morales. Sin considerar que era pública la dureza con que la Iglesia reprimía las «desviaciones» que pudieran darse en lo que consideraba nuclear a su doctrina. Incluso fuera de la Iglesia católica, entre los protestantes, se habían levantado voces airadas contra él antes de que el libro circulara como tal. El propio Lutero lo había execrado públicamente.

«Era de ingenio grave, elaborado, diligente y maduro; muy superior, en lo que a capacidad de juicio se refiere, a Ptolomeo, Hiparco y Eudoxo y de todos los que caminaron tras las huellas de estos.»

— Giordano Bruno acerca de Copérnico en *La cena de las cenizas*.

Por fortuna, en 1539 llegó a Frombork un joven animoso y emprendedor, atraído por la figura de aquel que quería convertir en su maestro. Se trataba de Georg Joachim Retyk, conocido como Rheticus, que a sus veinticinco años tomó sobre sus hombros la tarea de ser el campeón de la publicación del libro escondido.

Rheticus provenía de la Universidad de Wittenberg y era, curiosamente, un protegido de Melanchton, lugarteniente de Lutero. Había recorrido Alemania para conocer a algunos de los más reputados astrónomos de la época. En Núremberg visitó a Johannes Schöner, quien tenía entre manos la publicación de los manuscritos inéditos de Johannes Müller de Königsberg (Regiomontano), uno de los astrónomos y astrólogos más considerados de los últimos años. A través de Schöner, Rheticus conoció a Johannes Petreius, uno de los más destacados impresores de la época. Es posible que ambos le animaran a visitar a Copérnico y a tratar de convencerle para que publicase sus trabajos.

Cuando recibió al entusiasta Rheticus, el viejo maestro polaco —que tenía ya entonces 66 años— reconoció que había mantenido su obra en «un escondrijo, profundamente oculta». Entre

ambos se estableció pronto una relación muy estrecha. El astrónomo se dejó impresionar por la juventud y el entusiasmo del recién llegado y le permitió tener acceso directo a su manuscrito. La nueva teoría heliocéntrica y su sólida fundamentación cautivaron enseguida a Rheticus, quien publicó en 1540, en Gdansk, su *Narratio prima*, un avance de presentación sistemática de las ideas del maestro. En apenas un año se hizo una segunda edición en Basilea.

«Este todo que abarca la Luna, incluido el centro de la Tierra, se traslada a través de aquella gran órbita entre las otras estrellas errantes, en una revolución anual alrededor del Sol, y alrededor del mismo está el centro del mundo.»

— *De revolutionibus*, Copérnico.

Consciente de las reacciones que iba a provocar, Rheticus indica al comienzo de su *Narratio* que «quien quiera comprender debe tener un pensamiento independiente». Desde luego, la repercusión, a favor y en contra, fue enorme e inmediata. Es conocida, por ejemplo, la carta laudatoria que Rainer Gemma Frisius, astrónomo y profesor de Medicina en Lovaina, dirige al obispo Dantiscus.

Junto a esas alabanzas, se alzan voces contrarias a la doctrina copernicana. Aparte de Lutero, destacados pensadores contemporáneos suyos se expresaron en contra de Copérnico. Philipp Melanchton, maestro y protector de Rheticus, escribió en 1541: «Hay quien se figura que es un mérito magnífico y acertado elaborar algo tan absurdo como lo de aquel astrónomo que mueve la Tierra y detiene el Sol». Posteriormente, en 1549, en su *Initia doctrinae physicae*, volvió a cargar contra la nueva teoría, asegurando que era «un ejemplo pernicioso». Tampoco Calvino se privó de criticar duramente a Copérnico; llegó a declarar: «¿Quién se atrevería a sobreponer la autoridad de Copérnico a la de las Sagradas Escrituras?».

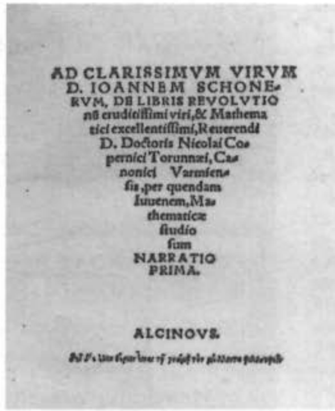
La desproporcionada efervescencia causada por este primer desarrollo del modelo heliocéntrico llevó a Rheticus a separar los

RHETICUS Y SU «NARRATIO PRIMA», EL PRIMER COPERNICANO

La *Narratio prima* refleja el aprecio que su autor, el joven Rheticus, profesaba a su mentor y maestro. En un intento por dar a conocer las teorías de Copérnico, el discípulo construyó, en un tiempo muy corto, una versión que resultaba más esclarecedora que el propio *De revolutionibus.* Esta pequeña gran obra consta de 74 páginas, de las cuales las 59 primeras desarrollan las ideas copernicanas. La *Narratio prima* constituye una buena síntesis de las teorías de Copérnico. Es especialmente interesante el apartado dedicado a «Las razones principales por las cuales debemos abandonar las hipótesis de los antiguos astrónomos». Entre las cinco razones que da Rheticus,vale la pena enfatizar la cuarta:

> Mi maestro vio que solo con esta teoría [heliocéntrica] podrían hacerse girar, de un modo satisfactorio, uniforme y regular, todos los círculos del universo alrededor de sus propios centros.

Portada de la *Narratio prima,* escrita por Rheticus, el discípulo y gran admirador de Copérnico. Como se ve en esta portada, era la «primera narración» del libro *De revolutionibus* «del eruditísimo y excelentísimo matemático, reverendo doctor don Nicolás Copérnico, torunense».


AD CLARISSIMVM VIRVM
D. IOANNEM SCHONE-
RVM, DE LIBRIS REVOLVTIO
nũ eruditissimi viri, & Mathema
tici excellentissimi, Reuerendi
D. Doctoris Nicolai Co-
pernici Torunnæi, Ca-
nonici Varmien-
sis, per quendam
Iuuenem, Ma-
thematicæ
studio
sum
NARRATIO
PRIMA.

ALCINOVS.

aspectos puramente trigonométricos que formaban parte del *De revolutionibus* y publicarlos aparte bajo el título de *De lateribus et angulis triangulorum*. Se publicó en Wittenberg en 1542, con un epigrama del obispo Dantiscus a modo de prólogo.

Conseguir el apoyo del obispo Dantiscus a esta obra de geometría no era un asunto baladí. Al contrario, el obispo había decretado condena contra los poseedores de libros luteranos; parecía que la tolerancia entre católicos y reformistas estaba llegando a su fin y el mayor colaborador de Copérnico era Rheticus, uno de esos herejes precisamente. El joven discípulo tendría claro que se cernían dificultades importantes para imprimir el ansiado

libro. Presumiblemente Rheticus movió sus contactos en Wittenberg y Núremberg para eludir cualquier problema teológico.

Pero Copérnico estaba ya muy enfermo y seguía preocupado con la amenaza de ser declarado hereje. Por eso redactó en 1542, un año antes de que definitivamente se editara su *De revolutionibus*, una carta-dedicatoria al papa Paulo III, gran aficionado a la astronomía. Con esto pretendía un salvoconducto para sí y para su obra. En ella declaraba que el papa «puede reprimir con su autoridad y criterio los ataques de lenguas calumniadoras».

Rheticus encargó la edición a Andreas Osiander, un editor y teólogo protestante que, al parecer, sintió también la amenaza que podía cernirse sobre el texto y sobre aquellos que hubieran sido responsables de que viera la luz y se distribuyera por el orbe. Por eso, sin permiso de Copérnico, agregó un prólogo sin firmar, bajo el título *Ad lectorem de hypothesibus huius operis*, con el que pretendía aligerar responsabilidades. En él se declaraba que la nueva teoría era un esquema matemático ficticio. Textualmente declaraba: «No es necesario que estas hipótesis sean verdaderas, ni siquiera verosímiles [...]. No se las expone para convencer a nadie de que sean verdaderas, tan solo para facilitar el cálculo». Se volvía a recurrir al artificio de separar lo que la matemática predecía de la realidad observable.

Para colmo, Osiander alteró el título del libro, añadiéndole *«orbium coelestium»* para hacer pensar que la Tierra estaba excluida del nuevo modelo, pues no se consideraba un cuerpo celeste. Pero basta una lectura de los primeros capítulos para entender que Copérnico está hablando de algo que considera real, aunque no sea intuitivo. El movimiento del Sol, tal como lo percibimos, es aparente; quien se mueve es la Tierra, a pesar de los mensajes que recibimos de nuestros sentidos.

Al parecer, ni Rheticus ni Giese estuvieron al tanto de ese prefacio anónimo ni de la alteración del título hasta que vieron la obra publicada. El mismo obispo Giese llegó a escribir una carta al Consejo de la ciudad de Núremberg pidiendo una reparación, consistente en volver a imprimir el principio del libro; incluso reivindicó que se adjuntara, a las copias aún no vendidas, una pequeña obrita de Rheticus en la que este justificaba que el



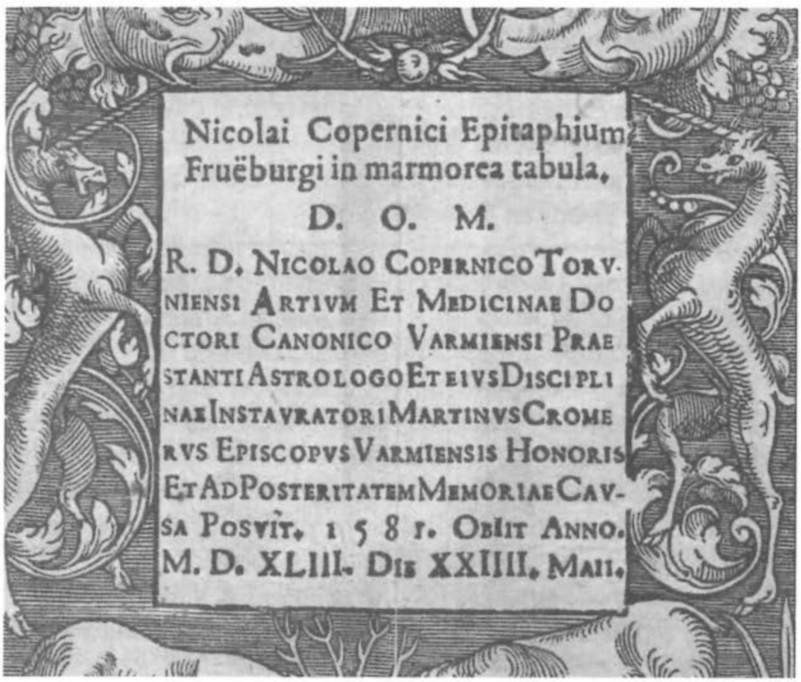


FOTO SUPERIOR:
Monumento a Copérnico ante la catedral de Frombork, ciudad donde el gran astrónomo vivió sus últimos treinta y tres años de vida (de 1510 a 1543). En esta catedral sería enterrado a su muerte.

FOTO INFERIOR:
Epitafio de Copérnico, escrito en el año 1581 por Martin Cromer, el príncipe-obispo de Warmia. En él se indica la fecha de fallecimiento de Copérnico: 24 de mayo de 1543. El texto alaba así a Copérnico: «Torunense, doctor en artes y medicina, canónigo de Varmia, preclaro astrólogo e instaurador de esta disciplina».

movimiento de la Tierra no es contrario a las Sagradas Escrituras. Esta obra, perdida durante siglos, fue encontrada de nuevo y publicada en 1984. El impresor se excusó, escudándose en que se había limitado a publicar el manuscrito que le había llegado. Mucho después, Kepler desacreditó a Osiander y, dentro de lo que cabe, deshizo el entuerto.

«Con gran expectación espero la obra matemática del ilustre varón [...]. En verdad esta obra aparece en momento adecuado para iluminar el ocaso del gran hombre con la luz de la inmortalidad.»

— Rainer Gemma Frisius, carta.

La impresión se realizó en Núremberg por el editor Johannes Petreius, con el título completo: *Nicolai Copernici Torinensis De Revolutionibus Orbium Coelestium, Libri VI.* Se trataba de una edición en folio que incluía un capítulo introductorio con el prólogo de Osiander ya mencionado, una carta fechada el primero de noviembre de 1536 y dirigida por el cardenal de Capua a Copérnico; y el citado *Praefatio Authoris*, la carta dirigida a Paulo III en la que el autor le solicitaba al papa que lo defendiera frente a los esperables ataques. Parece que la edición constó de algo menos de 500 copias. La magnitud de las expectativas que despertó puede medirse en el alto número de copias que han llegado hasta nuestros días, 277, muchas de ellas enriquecidas con notas marginales de puño y letra de prestigiosos astrónomos, matemáticos y teólogos, que se mostraron interesados por esta primera edición.

Los primeros ejemplares salieron del taller el 21 de marzo de 1543 y no se sabe con precisión si Copérnico llegó a ver el libro impreso, ya que falleció el 24 de mayo de ese mismo año, tras haber estado enfermo desde el año anterior. Circula la leyenda de que lo recibió en su lecho de muerte, pero la leyenda carece de fundamentación documental. Puede que fuera eso lo que buscase el astrónomo: lanzar la piedra de su teoría y esconderse en la muerte para no tener que sufrir las críticas irracionales ni las condenas interesadas.

EL MODELO COPERNICANO

El manuscrito original consta de algo más de doscientas páginas, incluyendo tablas y figuras. A esto deben añadirse la dedicatoria y el prólogo. Respecto a este último, el que se conserva es el que escribió Osiander en sustitución del originario del autor. Aunque a la muerte de Copérnico el obispo Giese, su buen amigo, hizo muchos esfuerzos para recuperar dicho prólogo original, este no ha llegado hasta nosotros. No así el resto del manuscrito, conservado sin encuadernar por Rheticus. Este manuscrito, tras pasar por diversas manos, se encuentra en la Universidad Jagellónica de Cracovia.

El texto está organizado en seis libros con un total de 131 capítulos, de extensión breve cada uno de ellos. Su contenido puede resumirse así:

Libro I: Sus primeros 11 capítulos dan una visión general de la teoría heliocéntrica y un resumen de la nueva cosmología. Los 4 últimos capítulos, que originariamente formaban parte de un libro independiente, constituyen una introducción a la trigonometría (véase la figura 1).

Libro II: Contiene 14 capítulos. Describe los principios de la trigonometría esférica y su aplicación al cálculo de numerosos parámetros de interés para los cuerpos celestes. Incluye, al final, un catálogo de las estrellas fijas, clasificándolas según sean visibles en la región norte, sur o media.

Libro III: Describe los movimientos aparentes del Sol y fenómenos relacionados. Está formado por 26 capítulos, destinando los 12 primeros a estudiar solsticios y equinoccios. Los capítulos restantes se enfocan a determinar la duración del año solar y analizar la uniformidad de su movimiento (véase la figura 2).

Libro IV: Describe los movimientos orbitales de la Luna. Lo constituyen 32 capítulos. En ellos se considera el movimiento lunar, sus fases, problemas de paralaje, el valor relativo de los diámetros de la Tierra, la Luna y el Sol y las distancias entre

los tres, las conjunciones y oposiciones de Sol y Luna y, en los dos últimos capítulos, la extensión y duración de los eclipses (véase la figura 3).

Libros V y VI: Contienen la exposición del nuevo sistema y explican cómo calcular las posiciones de objetos astronómicos utilizando el modelo heliocéntrico. En el primero de estos libros, dedica un primer capítulo a analizar los movimientos de los otros cinco planetas; el capítulo 2 se orienta a resumir la teoría ptolemaica y el 3 a introducir el movimiento terrestre para explicar la falta de uniformidad en los movimientos observados. Los capítulos 4 a 9 están dedicados a Saturno; los capítulos 10 a 14, a Júpiter; del 15 al 19, se estudia Marte; del 20 al 24, Venus y, del 25 al 31, Mercurio. Los restantes capítulos del Libro V consideran procedimientos para calcular las trayectorias de estos cinco planetas. El Libro VI está totalmente dedicado a analizar la latitud de estos cinco planetas y a explicar su inclinación.

En la obra se incluyen numerosas tablas astronómicas, muchas de ellas obtenidas a partir de observaciones de terceros, y se discuten aspectos relacionados con la duración del año, los períodos de otros planetas o el tiempo transcurrido desde algunos hechos históricos de la antigüedad. Asimismo, Copérnico proporciona al lector especializado un conjunto de tablas con las prostaféresis de los diferentes astros. Tales tablas corresponden a un método de cálculo rápido muy usado en ese momento pero luego caído en el olvido con la introducción de los logaritmos.

Pese a los detalles contenidos en sus seis libros, es la primera veintena de páginas la que resume y presenta las nuevas teorías. En esas páginas iniciales, que abarcan los once primeros capítulos del Libro I, se explica que el Sol está inmóvil en el centro de la esfera de las estrellas fijas. Alrededor de él giran los planetas, siguiendo trayectorias circulares (hay que entender aquí «combinaciones» de trayectorias circulares) en un mismo plano. Los planetas, a partir del Sol ocupan las posiciones que hoy conocemos, con la Tierra en el tercer lugar, entre Venus y Marte.

La Luna gira alrededor de la Tierra y, por tanto, sigue a esta en su órbita en torno al Sol. Finalmente, la Tierra gira sobre sí misma, dando lugar a la sucesión del día y la noche. En este modelo, las irregularidades observadas se deben a la oscilación del eje terrestre.

Siguiendo la estructura de esos primeros capítulos, Copérnico comienza postulando que el universo (cap. 1) y la Tierra (cap. 2) son esféricos, y que tierra y agua forman un globo y se apoyan en un centro de gravedad común (cap. 3). A continuación establece un principio que nos muestra que no rompe del todo con las concepciones aristotélicas: «El movimiento de los cuerpos celestes es regular y circular, perpetuo o compuesto de movimientos circulares» (cap. 4).

Los capítulos 5 a 8 de este primer Libro abordan el movimiento y posición de la Tierra, y su tamaño relativo al del universo. Copérnico expone las razones por las que los clásicos consideraron a nuestro planeta inmóvil y centro de todo (cap. 7) y las rebate, dando una explicación sobre la gravedad y su influencia en que no notemos el movimiento del globo

FIG. 1

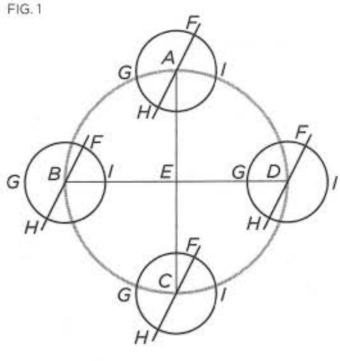


FIG. 2

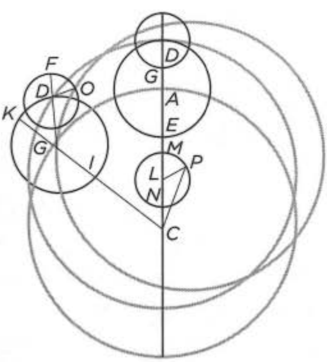


FIG. 3

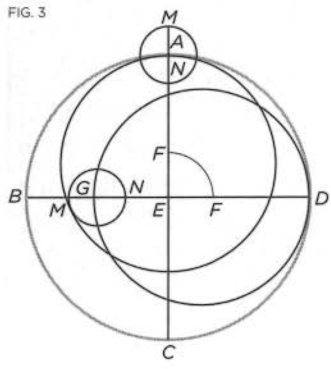


FIGURA 1:
Ilustración del Libro I, cap. 11, del *De revolutionibus*, en la que se muestra el triple movimiento terrestre: rotación sobre su eje, traslación alrededor del Sol y movimiento de declinación.

FIGURA 2:
Ilustración del Libro III, cap. 20, del *De revolutionibus*, sobre la segunda y doble irregularidad del Sol.

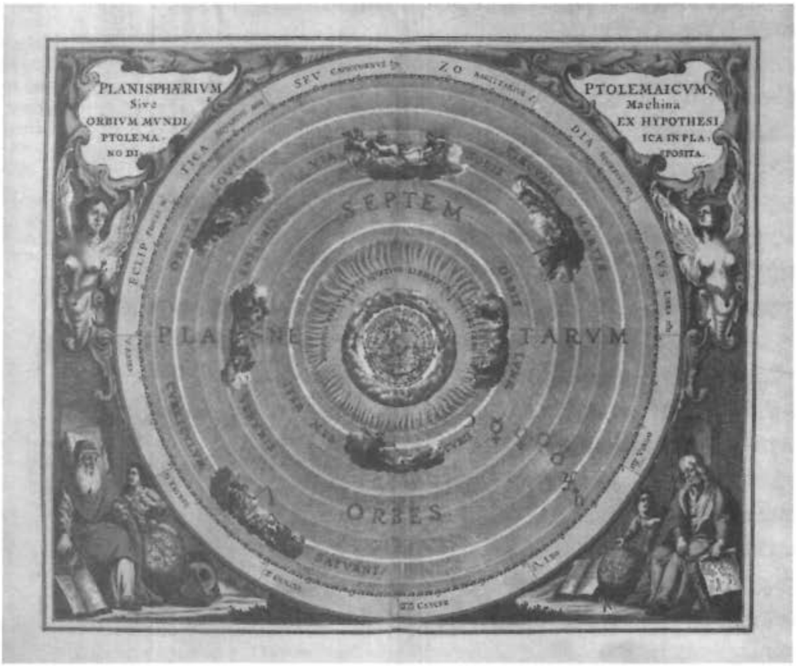
FIGURA 3:
Ilustración del Libro IV, cap. 1, del *De revolutionibus*, en la que se muestran los círculos lunares.

LOS DOS SISTEMAS, FRENTE A FRENTE

Quizá la representación más conocida —y, sin duda, la más bella— de los dos grandes sistemas astronómicos de la historia es la que hizo el cosmógrafo holandés de origen alemán Andreas Cellarius (ca. 1596-1665) en su magnífica obra *Harmonia macrocosmica* (1660), que incluía ilustraciones de Hendricus Hondius, Johannes van Loon y otros grandes cartógrafos holandeses de la época. La obra fue publicada por el editor Johannes Jansonius (1588-1664) como el séptimo volumen del gran proyecto del cartógrafo Mercator (1512-1594): un gran atlas del cosmos entonces conocido. En él se incluyen estas dos bellas ilustraciones (los originales son a color), que representan las dos principales cosmovisiones de entonces.

El sistema ptolemaico

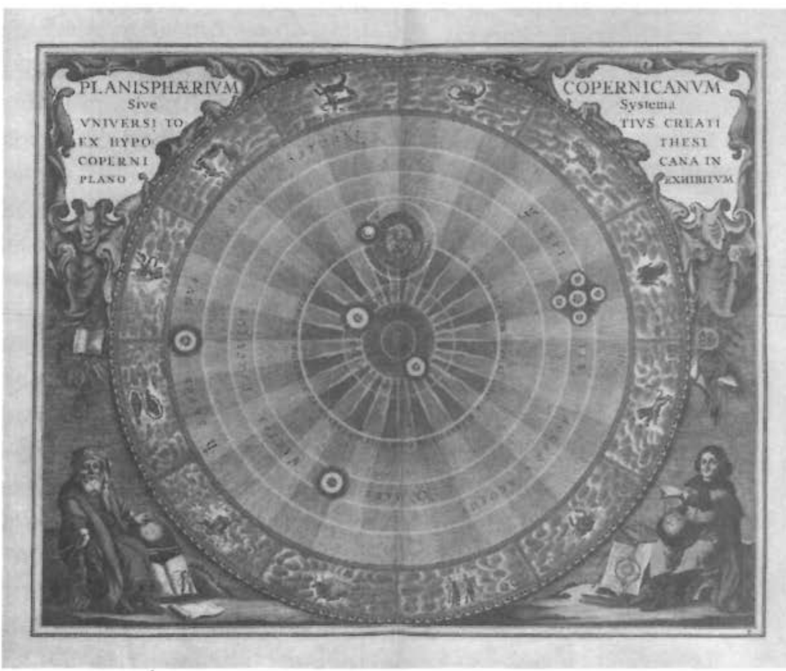
La primera ilustración muestra el *Planisferio ptolemaico, o sea, la máquina* [los movimientos] *de las órbitas del mundo, según la hipótesis ptolemaica, dis-*



puesta en un plano. La Tierra está en el centro, con el agua, el aire y el fuego (los cuatro elementos) y a su alrededor las «Siete órbitas de los planetas»: la Luna, Mercurio, Venus (Veneris, en latín), el Sol (Solis, en latín), Marte, Júpiter (Iovis, en latín) y Saturno. Por fuera, la «Eclíptica o Zodíaco», con las constelaciones formadas por las estrellas fijas.

El sistema copernicano

La segunda ilustración muestra ya el nuevo *Planisferio copernicano* [representa a Copérnico en la esquina inferior derecha], *o sea, el sistema de todo el universo creado, según la hipótesis copernicana, mostrado en un plano.* El Sol ocupa ya el centro del universo y a su alrededor giran los planetas entonces conocidos: Mercurio, Venus, la Tierra (con su satélite, la Luna), Marte, Júpiter (con los cuatro satélites ya descubiertos por Galileo) y Saturno, más las constelaciones formadas por las estrellas fijas. El Sol y la Tierra (acompañada por la Luna) han intercambiado sus posiciones. El cambio de un sistema al otro ha sido espectacular: toda una revolución.



terrestre (cap. 8). Su concepto de gravedad tiene poco que ver con la gravitación universal de Newton, ya que es local y referida solo a la Tierra.

En su esquema, la Tierra está sometida a tres movimientos (cap. 9), cuya explicación considera con detalle en relación al Sol (cap. 11): *rotación* sobre sí misma, *traslación* alrededor del Sol y *precesión* de su eje de giro. En realidad, Copérnico llama a este tercer movimiento *declinación* y lo supone opuesto al movimiento anual y con el mismo período. Es decir, no lo llega a determinar como lo conocemos hoy día, pero sí lo hace responsable de que el eje terrestre forme un ángulo fijo con la eclíptica a lo largo del año y, por tanto, el Sol vea al eje terrestre con distinta inclinación según la estación. Con todo, el capítulo clave es el 10, donde se expone que el Sol es el centro del cosmos, contra toda apariencia, justificando esta idea y repitiendo el orden de las órbitas que ya había introducido en el *Commentariolus*. La Luna aparece aquí vinculada a la Tierra.

Copérnico, en esas primera páginas del primer Libro, rompía con la concepción geostática y abandonaba también el geocentrismo. Pero no se había desligado por completo de las ideas clásicas y mantenía ciertos conceptos preconcebidos que no le habían sido sugeridos por sus observaciones. En efecto, la esfera y la circunferencia continuaban teniendo un valor absoluto. Creía, igualmente, que la velocidad a la que se mueven los astros tenía que ser uniforme, sobre la base de la tradición filosófica. Finalmente, para él seguían teniendo existencia las esferas cristalinas de Aristóteles y vinculaba el eje de la Tierra rígidamente a una esfera centrada en el Sol. Si esto fuera cierto, el eje de rotación terrestre debería mantener la misma inclinación con respecto al Sol, por lo que no se podrían explicar las estaciones. De ahí ese tercer movimiento que introdujo, basándose en las ideas de «trepidación» de Ibn-Qurra.

En este sentido, no es de extrañar que algunos autores actuales señalen que Copérnico se encuentra en la frontera entre la ciencia clásica y la moderna. Sus contribuciones dan lugar a la aparición del pensamiento moderno, aunque la naturaleza de aquellas esté más en la *elección* que en el *descubrimiento*. Copér-

nico elige creer que sus proposiciones son correctas y las respalda con una gran cantidad de datos, con cálculos y con innovaciones técnicas. A todo esto es a lo que dedica las otras (aproximadamente) doscientas páginas de su obra. Textualmente viene a decir:

> Emprendí la tarea de releer los libros de todos los filósofos que pude conseguir [...]. Comencé a pensar en un movimiento de la Tierra; y aunque la idea parecía absurda, como otros antes de mí se habían permitido suponer ciertos círculos para explicar los movimientos de las estrellas, creí que me sería fácilmente permitido intentar si, sobre la hipótesis de algún movimiento de la Tierra, no podrían encontrarse mejores explicaciones de las revoluciones de las esferas celestes.

En esto es, sin duda, un científico moderno. Reúne la bibliografía disponible, la analiza y la critica. Busca luego una hipótesis de trabajo, apartándose de lo trillado, de lo dado por seguro. Y, con los resultados empíricos en la mano, verifica que esa hipótesis, aunque parezca absurda desde la percepción de los sentidos, es más correcta que el modelo imperante.

Eso sí, resulta curioso que, entre los astrónomos antiguos que dice haber leído, las referencias a Aristarco de Samos (Libro III, caps. 2, 6 y 13) solo tengan que ver con la precesión de los equinoccios o la duración del año, pero nunca con la concepción heliocéntrica. ¿Casualidad? ¿Olvido intencionado? Es verdad que, en la única obra de este astrónomo que se ha conservado, su *De los tamaños y las distancias del Sol y de la Luna*, parte de un modelo geocentrista; pero no es menos cierto que autores posteriores han hecho mención a las ideas ya heliocentristas de Aristarco.

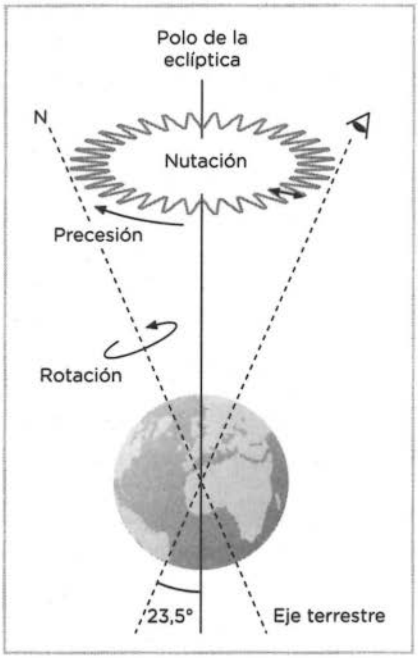
Aunque hemos citado en su lugar las observaciones de Copérnico de las que se tiene constancia, la mayoría de los datos empíricos que ofrece en el *De revolutionibus* pertenecen a otros autores. Fueron sus fuentes principales el *Epitome in Almagestum* de Regiomontano y Peuerbach, editado en 1496, la traducción latina del *Almagesto* hecha por Bernardo de Cremona y editada en Venecia en 1515 y las *Tablas alfonsíes*, cuyo manejo había aprendido en la Academia de Cracovia.

En realidad, las diferencias entre el modelo de Ptolomeo y el de Copérnico se reducen esencialmente al intercambio de papeles entre la Tierra y el Sol y a la dinámica terrestre: se pasa de un modelo geostático y casi geocéntrico a uno geodinámico y heliocéntrico. En términos de complejidad, Copérnico reduce un poco el número de circunferencias necesarias para explicar las trayectorias astrales, pero conserva una complejidad intrínseca similar a la del sistema ptolemaico. Si consideramos ambos modelos desde la perspectiva de los cálculos que requieren, Copérnico eliminó los ecuantes pero refirió los movimientos de los planetas no al Sol sino al centro de la órbita terrestre, lo que introdujo errores significativos en las latitudes de los planetas, sobre todo en el caso de Marte. Respecto a Mercurio, que fue tratado por Ptolomeo como un caso singular, Copérnico le dio el mismo tratamiento aunque introduciendo algunas complicaciones adicionales.

Un hecho significativo es que los planetas interiores —«inferiores» en la terminología ptolemaica—, de acuerdo con los datos que manejaba, debían alcanzar su mayor distancia angular respecto al Sol cuando el sistema Sol-planeta-Tierra formase un determinado ángulo, lo que es coherente con las posiciones de máxima elongación de las que hemos hablado.

También hay que hacer notar las diferencias que pueden observarse en el modelo tal como se introduce en el *Commentariolus* y su versión definitiva, descrita en *De revolutionibus*. En efecto, aunque ambos textos apuestan decididamente por el heliocentrismo, en el *Commentariolus* la mecánica planetaria es sensiblemente más complicada: un planeta describe un primer epiciclo, cuyo centro se mueve sobre un segundo epiciclo, cuyo centro, a su vez, se mueve sobre una circunferencia deferente centrada en el Sol. En cambio, en *De revolutionibus* la dinámica es similar a la ptolemaica aunque con el intercambio de los papeles del Sol y de la Tierra. Por otra parte, en el *Commentariolus* se afirma que la excentricidad de la órbita terrestre posee siempre el mismo valor y que la posición del apogeo solar no cambia respecto a las estrellas fijas; en cambio, en *De revolutionibus* esto no es así, pues según se nos dice en el texto, sus observaciones, llevadas a cabo en 1515, le han obligado a dejar de lado esa idea.

LA PRECESIÓN DE LOS EQUINOCCIOS



Movimientos combinados de precesión y nutación del eje terrestre.

El eje de rotación de la Tierra presenta una inclinación con respecto al polo de la eclíptica, es decir, al plano en el que nuestro planeta gira alrededor del Sol. Las consecuencias de esa inclinación se concretan en el tercer movimiento que Copérnico propone en su obra *De revolutionibus.* Debido a la deformación de la Tierra, la atracción gravitatoria del Sol origina un momento que tiende a modificar la dirección del eje terrestre. Dicho eje se ve así sometido a un movimiento de giro que responde a una forma cónica, similar al movimiento de *precesión* de un trompo o peonza. En la figura se ha representado el movimiento del eje, que gira en torno a una circunferencia; el período de este giro es lento: 25776 años, ciclo que se conoce como *año platónico.* Superpuesto a la precesión existe otro movimiento denominado *nutación,* debido a que la velocidad de precesión no es constante; esto se traduce en que el giro del eje sufre además oscilaciones locales que lo obligan a una trayectoria más compleja, tal como se indica en la figura, donde se han combinado ambos movimientos. No existe todavía un modelo satisfactorio para la nutación, debido a la superposición de varios efectos. Se cree que el primero que estudió este tipo de movimientos fue Hiparco; y también habló de ellos Teón de Alejandría (ca. 335-405). En el siglo IX, Ibn-Qurra desarrolló su teoría de la trepidación, que fue un antecedente de las consideraciones de Copérnico sobre el tercer movimiento terrestre.

Estas disparidades muestran que, a lo largo de los años, el astrónomo polaco fue acomodando sus teorías a sus resultados empíricos. También queda probado que su concepción del cosmos

no estaba acabada en el momento en que escribe la primera de esas obras, como algunos han pretendido.

Con todo, podemos resumir las contribuciones de Copérnico en cuatro líneas básicas:

— Posicionó a la Tierra en su lugar correcto dentro del sistema solar, estableciendo un modelo heliocéntrico.

— Clarificó la conexión entre las observaciones experimentales y los parámetros del modelo.

— Determinó un criterio para asignar distancias relativas a cada uno de los planetas.

— Sugirió una solución válida al problema de determinar las latitudes de cada planeta.

Como contrapartida, mantuvo una complejidad innecesaria sin lograr mejorar la precisión. Incluso en el caso particular de Marte, su modelo presentaba errores importantes.

Pero quizá la mejor justificación de su modelo, la que usó frente a sí mismo, hay que encontrarla en la búsqueda de una alternativa cualitativamente más elegante, en la búsqueda de la belleza de su solución. En el fondo, es su profundo y convencido neoplatonismo el que está en la raíz de su trabajo.

CAPÍTULO 4

Un modelo que perdura pese a todo

La obra de Copérnico no fue bien entendida por sus contemporáneos. Habrían de transcurrir más de cincuenta años desde la publicación de su obra para que dos genios de la ciencia moderna, Galileo y Kepler, refrendaran y culminaran su cambio de paradigma. Entre tanto, las iglesias cristianas habían reaccionado contra una teoría en la que solo veían un ataque a sus dogmas.

Desde una perspectiva filosófica, el sistema introducido por Copérnico presentaba contradicciones con lo admitido tradicionalmente. Era necesario hallar una explicación a los nuevos movimientos de la Tierra que se postulaban. ¿Podía el «primer motor» de Aristóteles seguir sirviendo para justificar la dinámica celeste? Además, el movimiento circular y uniforme, o sea, perfecto, estaba reservado al cielo. Atribuirlo a nuestro mundo parecía un sinsentido.

Otra dificultad provenía de una observación elemental: ¿por qué cae una piedra hacia el suelo si la Tierra no es el centro del universo? Si no lo es, debería caer hacia el Sol. Copérnico intentó resolver este problema manteniendo que las cosas obedecen a una «tendencia natural de las partes de un todo, que han sido separadas de ese todo, a volver a él»; de esa manera, los cuerpos «terrestres» tenderían a acercarse a su «todo», que es la Tierra, y no al «centro del mundo», que les es ajeno. Explicación endeble, si las hay.

Otro tema dudoso era la composición de la materia estelar. Hasta ese momento, dado que los demás cuerpos celestes quedaban separados de nuestro planeta, su composición podía parecer diferente. Pero, si la Tierra era solo otro astro más orbitando en torno al Sol, surgía una pregunta: ¿estaban hechos los demás planetas de la misma sustancia que el nuestro? ¿Y el Sol? ¿Y las estrellas? Copérnico había hecho añicos la intocable distinción entre el espacio sublunar y el supralunar. El concepto de éter se ponía así en entredicho.

La misma Luna presentaba otra paradoja conceptual: ¿por qué ese astro rotaba alrededor del nuestro? ¿Por qué solo él? Y, por otro lado, ¿por qué la Tierra no lo dejaba atrás en su movimiento progresivo?

A esto hay que añadir el problema del paralaje de las estrellas. Buena parte de la justificación experimental del modelo copernicano residía en observaciones; en particular, en medidas del paralaje de los planetas. Pero este fenómeno no se observaba con las estrellas. En realidad, no es que el paralaje estelar no exista, sino que las estrellas están tan alejadas que, con los métodos e instrumentos disponibles en el siglo XVI, era imposible de detectar. Harían falta trescientos años más para comenzar a medirlo. Copérnico acertó al considerar que lo que ocurre es que las estrellas están demasiado alejadas de nuestro planeta.

No debemos dejar atrás el hecho de que el nuevo modelo terminaba recurriendo a los mismos artificios matemáticos que su predecesor. Deferentes y epiciclos volvían a ser necesarios, e incluso Copérnico tuvo que echar mano de un disimulado ecuante al admitir que las órbitas planetarias estaban centradas en una especie de Sol promedio.

Pese a todos esos interrogantes, el nuevo sistema abría las puertas a un universo nuevo. Sobre él iría a descansar la concepción del cosmos que la ciencia ha ido acuñando con sus continuos avances. Como en tantos otros descubrimientos —pequeños o grandes—, la solución aportada por el sabio de Torún no era perfecta. Dejaba cabos sueltos, no respondía a todas las preguntas. Pero eso no debe empañar su naturaleza de paso de gigante.

COPÉRNICO Y EL MÉTODO CIENTÍFICO

Más allá de sus resultados, el astrónomo de Torún merece nuestro respeto y aprecio por su método de trabajo.

Para entender la minuciosidad de su quehacer, vale la pena transcribir las palabras con que Rheticus lo expresa en su *Narratio prima*:

> Mi maestro siempre tiene ante sus ojos las observaciones de todas las épocas junto con las suyas propias, reunidas en orden como en catálogos; entonces, cuando se debe extraer alguna conclusión o hacer alguna contribución a la ciencia o a sus principios, procede desde las más antiguas observaciones hasta las suyas propias, buscando las relaciones mutuas que las armonicen a todas ellas; el resultado así obtenido [...] lo compara con las hipótesis de Ptolomeo y de los antiguos; y, habiendo realizado un examen más cuidadoso de estas hipótesis, encuentra que las pruebas astronómicas requieren ser rechazadas por él; supone nuevas hipótesis, no sin inspiración divina y favor de los dioses; aplicando las matemáticas establece geométricamente las conclusiones que pueden ser extraídas por medio de una inferencia correcta; entonces armoniza las observaciones antiguas y las suyas propias con las hipótesis que ha adoptado; y, después de realizar todas estas operaciones, finalmente redacta las propias leyes de la astronomía.

No cabe duda de que, más allá de su trascendental hallazgo, el heliocentrismo, Copérnico es el primer ejemplo de científico moderno. Su influencia en la ciencia posterior ha sido enorme, difundiéndose sus ideas y su dinámica de trabajo, logrando ambas una aceptación unánime. Pero esa difusión no fue sencilla.

TIEMPOS DE PERSECUCIÓN

La obra de Copérnico no había dejado indiferente a los teólogos protestantes. Aunque sin la ayuda de algunos miembros de la Iglesia reformada hubiera sido imposible publicar las ideas copernicanas, lo cierto es que Lutero, Melanchton y Calvino se manifestaron abiertamente opuestos a una teoría que consideraban que era contraria a las Sagradas Escrituras. Tanto luteranos como calvinistas se posicionaron en contra de la nueva visión del cosmos. Sin embargo, el carácter descentralizado de las iglesias protestantes no favoreció la existencia de mecanismos para perseguir a los estudiosos que se adhirieron al modelo heliocéntrico.

En ese sentido, los primeros seguidores firmes de la nueva teoría fueron miembros de la escuela luterana de Wittenberg. Aparte de Rheticus, los astrónomos alemanes Erasmus Reinhold (1511-1553), Caspar Peucer (1525-1602) y Johannes Praetorius (1537-1616) fueron firmes defensores de la cosmología copernicana. A ellos cabe añadir la figura de Tycho Brache, que tan activamente promovió su estudio.

En el momento en que se publicó *De revolutionibus*, la Iglesia católica estaba muy ocupada con dos problemas. Por un lado, la preparación del Concilio de Trento (1545-1563), en el que se pasó de las posturas de tolerancia con la Reforma, que habían imperado hasta entonces, a una intolerancia absoluta, que enseguida copiaron los hermanos reformados. La Sagrada Congregación de la Inquisición, creada en 1542, y el *Índice de libros prohibidos* fueron alargando su sombra hacia lo que pudiera considerarse herejía y, por extensión, a cualquier forma de pensamiento libre.

El otro tema que preocupaba en Roma era la reforma del calendario, discutida durante la primera mitad del siglo XVI y finalmente aprobada en 1580. Como se ha comentado anteriormente, Copérnico dio su opinión en 1513 respecto a la necesidad de esperar a tener una medida más precisa de la duración del año. En el *De revolutionibus* comentó y fijó esa duración, lo que tendría una influencia directa sobre los que dieron forma al nuevo calendario.

Entre 1530 y 1543, año de la publicación del libro de Copérnico, Roma había mantenido una posición favorable a sus teorías astronómicas e incluso Copérnico había recibido el apoyo de destacados miembros de la Curia. El cardenal Nikolaus von Schönberg, su amigo el obispo Tiedemann Giese y los papas Clemente VII (1523-1534) y Paulo III (1534-1549) animaron de distintas formas a Nicolás a dar a conocer sus teorías. Pero, entre 1543 y 1546 sucedió un hecho que cambió la situación: fue nombrado censor de libros el dominico Bartolomeo Spina (ca. 1475-1546). Llevado por su celo represivo, pidió la condena del *De Revolutionibus* por razones idénticas a las esgrimidas por los protestantes: la propalación de tesis contrarias a las Escrituras y al pensamiento aristotélico. La muerte de Spina en 1546 paralizó las actuaciones, pero la idea fue ganando peso a medida que progresaba el Concilio de Trento.

LA REFORMA PROTESTANTE



A lo largo del siglo XVI, diversos religiosos y pensadores plantearon un cambio en profundidad de la vida de la Iglesia católica, sobre todo en ciertos puntos que consideraban esenciales. Este movimiento, básicamente religioso, aunque con connotaciones políticas también, recibió el nombre genérico de Reforma protestante. Pretendía revitalizar el cristianismo retomando usos y costumbres de sus primeros tiempos y trataba de reformar la Iglesia para hacer que el edificio clerical estuviese más acorde con las enseñanzas de Jesucristo. La segunda generación de humanistas se apuntó pronto a estas doctrinas, que fueron primero predicadas por el agustino Martín Lutero (en la ilustración), quien revisó la doctrina oficial de la Iglesia en función de su conformidad con las Sagradas Escrituras. Rechazó el sistema sacramental católico, y, en especial, la venta y comercio de indulgencias, declarando que el Evangelio debía ser predicado, pero nunca vendido; de acuerdo con su interpretación de la Biblia, afirmaba también que los cristianos no precisaban ser ordenados sacerdotes, negaba la autoridad del papa y reducía los sacramentos a dos, que consideraba los únicos fundamentados en las Sagradas Escrituras. Asimismo subordinaba la Iglesia al poder político. En esencia, postulaba la salvación por la fe. Al principio, la Iglesia católica no dio demasiada importancia a las ideas de Lutero, ni a sus ataques contra la doctrina de la salvación por las obras. Pero muy pronto tuvo que reaccionar ante esta visión, tan apartada de la oficial de Roma, lo cual terminó llevando a Lutero y a sus seguidores a la excomunión.

Aunque el libro tuvo una buena acogida entre los estudiosos de la ciencia natural, no fue reeditado hasta 1566 y, en todo ese siglo XVI, el número de ejemplares en circulación fue pequeño. Probablemente la polémica se habría detenido si no hubiese sido por el eco que el heliocentrismo encontró, en la frontera de ese siglo con el siguiente, en personalidades tanto católicas como pro-

testantes. El alemán Johannes Kepler, el español Diego de Zúñiga, el inglés Thomas Digges y los italianos Paolo Antonio Foscarini, Galileo Galilei y Giordano Bruno se convirtieron, de una manera u otra, en abogados de la nueva cosmología y aprobaron abiertamente una interpretación no literal de la Biblia en temas relacionados con la naturaleza, siguiendo el espíritu de Agustín de Hipona, Ockham, Buridan, Oresme y Cusa. La reacción de la Curia fue inmediata. Condenado y asesinado en la hoguera Bruno en 1600, las obras de Copérnico y Zúñiga fueron colocadas en el *Índice de libros prohibidos* y Galileo fue procesado y condenado públicamente en 1633. El libro de Copérnico permanecería en el

LA CONTRARREFORMA

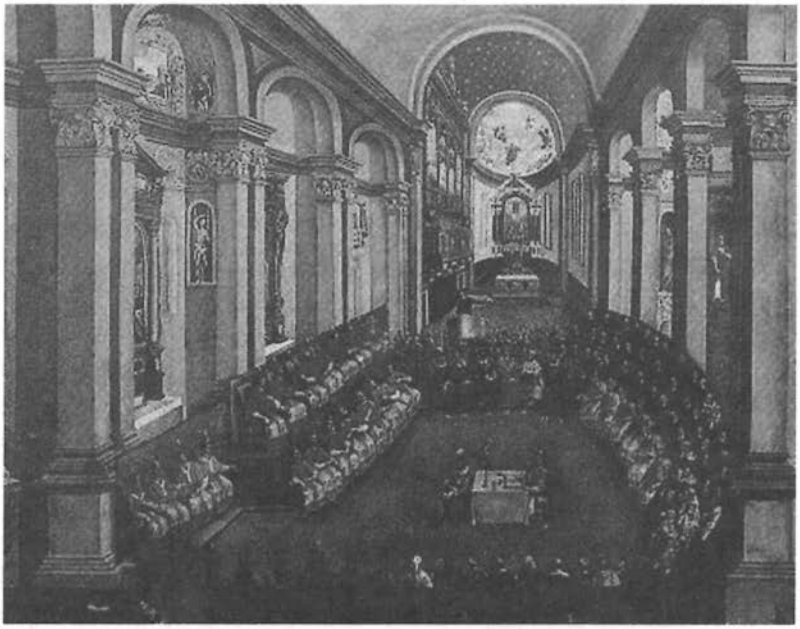
La Reforma luterana sorprendió a la Iglesia católica, que, durante más de dos décadas, intentó reaccionar de una forma conciliadora. Sin embargo, por toda Europa florecía un espíritu de cambio, que no era ajeno al Humanismo que le había precedido. Príncipes y cardenales se separaban de la doctrina oficial y cuestionaban o negaban la autoridad e infalibilidad del papa. Por otra parte, dentro del propio catolicismo crecía la idea de que era necesario que la misma Iglesia corrigiera los errores que habían conducido a esa situación, eliminando costumbres y vicios que la jerarquía había tolerado. A esta reacción, originada en el seno de la Iglesia católica, se la denominó Contrarreforma.

El Concilio de Trento

Para establecer los principios y las líneas maestras de esa renovación, se decidió convocar un concilio que acabó celebrándose en la ciudad italiana de Trento, comenzando en 1545; sus sesiones duraron hasta 1563, siendo interrumpidas por las defunciones sucesivas de los papas Paulo III, Julio III, Marcelo II y Paulo IV, que rigieron la Iglesia en ese período. Finalmente el concilio fue clausurado por Pío IV. En el Concilio de Trento no participaron los protestantes por decisión propia. De él salió un conjunto de decisiones que pretendía eliminar errores y volver a la pureza originaria de la Iglesia. También se reafirmó la necesidad de elaborar un *Índice de libros prohibidos*. La Contrarreforma católica impulsó el renacimiento de la Roma papal y significó el ascenso de la Compañía de Jesús, fundada en 1534 por Ignacio de Loyola, que tuvo una activa participación en el concilio y se convirtió en la avanzadilla de la respuesta católica.

Índice hasta 1758, aunque su publicación siguió estando prohibida hasta 1835. La libertad de pensamiento significaba un grave riesgo para una Iglesia católica amenazada por el avance de la Reforma.

Estrictamente hablando, la obra de Copérnico no fue prohibida, sino solo suspendida en tanto no se hicieran correcciones que la adecuaran a la doctrina de la Iglesia. En ese sentido, se preparó una edición en la que se omitieron o modificaron nueve párrafos relacionados con el heliocentrismo. Dicha versión de su obra fue aprobada en el año 1620, pero esta edición nunca fue impresa y solo estuvo disponible, bajo petición, para estudiosos que estuvieran debidamente cualificados.



Sesión del Concilio de Trento, en la iglesia tidentina de Santa Maria Maggiore. En las diferentes sesiones de este concilio se definieron las líneas maestras de la Contrarreforma.

Resulta curioso que en la segunda mitad del siglo XVI se hicieran dos ediciones del *De revolutionibus*, mientras que en el mismo tiempo vieron la luz hasta 17 reimpresiones del *Initia doctrinae physicae* (1549) de Melanchton, obra en la que se refutaban las teorías copernicanas. Esto muestra una situación al menos peculiar.

La postura beligerantemente negativa de las Iglesias cristianas ha tenido una enorme influencia en el desarrollo científico de la cultura occidental. Esta oposición hacia la autonomía de la ciencia, en relación con la mal llamada esfera espiritual, se ha traducido en una separación entre los hechos científicamente probados y las concepciones emanadas de la teología cristiana. Es verdad que, lenta pero progresivamente, se han hecho esfuerzos en las últimas décadas para acercar posturas; pero la realidad es que el mundo de la ciencia ha aprendido a vivir sin necesitar la aprobación de unas jerarquías eclesiásticas que no aceptan las reglas del juego del conocimiento empírico. Peor aún, ciertos movimientos religiosos y sociales, como el creacionismo, mantienen todavía hoy doctrinas abiertamente contrarias a lo que la ciencia ha probado sobradamente.

SEGUIDORES Y DETRACTORES

Acabamos de mencionar el dramatismo que se vivió en torno a la aceptación de las doctrinas de Copérnico. Pese a las persecuciones, el espíritu renacentista y el afán de conocimiento encontraron acogida en hombres que no temían dichas persecuciones o que acomodaron las doctrinas de Copérnico en forma similar a como se había hecho con el modelo de Ptolomeo.

Además de Rheticus, otros astrónomos de la escuela de Wittenberg se hicieron eco de las propuestas de Copérnico. Aunque allí se acogieron positivamente las nuevas ideas, solo Rheticus puede considerarse un seguidor fiel. En Wittenberg hubo más bien una interpretación de la doctrina copernicana por la que se aceptaban sus modelos matemáticos pero se rechazaba su cosmología. Entre quienes siguieron ese camino se cuenta Erasmus Reinhold,

LA INQUISICIÓN: ¡AL «ÍNDICE DE LIBROS PROHIBIDOS»!

En el año 1616, la Inquisición decidió incluir el *De revolutionibus orbium coelestium* de Nicolás Copérnico en el *Índice de libros prohibidos*. Era la condena oficial de la revolución copernicana. En el mismo texto en el que se condenaba a Copérnico, se incluía también una obra de un autor español: los *Comentarios al libro de Job*, escritos por ese avanzado filósofo salmantino que fue Diego de Zúñiga (1536-ca. 1598). El texto de la Inquisición rezaba así:

> Esta Sagrada Congregación ha tenido conocimiento de la difusión y aceptación por muchos de la falsa doctrina pitagórica, toda ella contraria a las Sagradas Escrituras, de que la Tierra se mueve y el Sol está quieto, que es también enseñada en *De revolutionibus* [...] de Nicolaus Copernicus y en *In Job commentaria* de Diego de Zúñiga [...]. Por tanto, para que esta opinión no cause más perjuicio a la verdad católica, la Congregación ha decidido que esos libros de Nicolaus Copernicus y Diego de Zúñiga sean suspendidos hasta que se corrijan.
>
> Sagrada Congregación de la Inquisición,
> *Índice de libros prohibidos*
> 5 de marzo de 1616


INDEX LIBRORVM
PROHIBITORVM,
CVM REGVLIS CONFECTIS
per Patres a Tridentina Synodo delectos,
auctoritate Sanctiss. D.N. Pij IIII,
Pont. Max. comprobatus.
VENETIIS, M. D. LXIIII.

Portada del *Índice de libros prohibidos* de una edición de 1564. En él sería incluida la obra de Copérnico *De revolutionibus* cincuenta y dos años después.

que llegó a ser decano y rector de esa universidad. Este astrónomo protestante se sirvió del trabajo del sabio polaco para sus *Tablas prusianas*, que se utilizaron durante los estudios de reforma del calendario. No son, en esencia, más exactas que las *Tablas alfonsíes*, pero están basadas en los trabajos de Copérnico. Aun-

CALENDARIO GREGORIANO


Retrato del papa Gregorio XIII por el pintor italiano Lavinia Fontana.

La Iglesia había detectado que el uso del calendario juliano, mantenido a lo largo de toda la Edad Media, creaba un desfase progresivo en el tiempo asociado a cada fiesta móvil del año litúrgico. En 1582, el desfase acumulado significaba un anticipo de diez días. El reajuste del calendario se había discutido desde principios del siglo XVI, pero hasta el Concilio de Trento no hubo un mandato firme de la Iglesia para llevarlo a efecto. Finalmente, durante el papado de Gregorio XIII se abordó el problema, constituyéndose una comisión presidida por el jesuita alemán Cristóbal Clavio (1538-1612). Clavio, un reputado astrónomo, llevó a término los trabajos de esta comisión, en la que participó muy activamente el italiano Luigi Lilio (1510-1574). Se decidió tomar como valor del año trópico el dado en las *Tablas alfonsíes,* de 365 días, 5 horas, 49 minutos y 16 segundos. Las conclusiones finales fueron compiladas por Pedro Chacón (1526-1581), matemático y teólogo español, que redactó un *Compendium* con el dictamen definitivo, aprobado el 14 de septiembre de 1580. La solución que se adoptó para evitar ese desfase progresivo y mantener una medida cómoda del año civil fue introducir una excepción a la regla juliana de hacer años bisiestos (366 días) cada 4 años: en adelante, NO serían bisiestos los años múltiplos de 100 (1700, 1800, 1900...), excluidos los múltiplos de 400 (o sea, SÍ serían bisiestos 1600, 2000, 2400...). El calendario fue aceptado de inmediato por los países de influencia católica. En otros países se fue implantando progresivamente en un plazo de años o de siglos, según el caso.

que Reinhold no fue seguidor de la teoría heliocéntrica, sí mostró —como otros muchos astrónomos de la segunda mitad del XVI— su entusiasmo por la eliminación del ecuante que esta permitía.

El gran astrónomo danés Tycho Brahe, que puede considerarse el mayor observador del cosmos hasta la invención del telescopio, además de apreciar la eliminación del ecuante, consideró

importante introducir un sistema planetario homogéneo. Sin embargo, por razones religiosas, Brahe tampoco adoptó el modelo copernicano, llegando a un «compromiso» geo-heliostático: los dos planetas interiores rotan alrededor del Sol y ese conjunto, con el resto de los planetas, gira alrededor de la Tierra.

Entre los católicos, el jesuita Cristóbal Clavio (1538-1612), astrónomo alemán de primera fila de la época, que fue el principal contribuidor a la creación del calendario gregoriano, siguió la misma aproximación que sus colegas de Wittenberg: emplear el nuevo modelo cuando era superior, pero quedarse con la cosmología ptolemaica. En España, un colega de fray Luis de León, el agustino Diego de Zúñiga (1536-ca.1598), fue uno de los primeros defensores públicos de la nueva teoría. A él le cabe el «honor» de haber visto uno de sus libros condenado en la misma acta en la que fue condenado el *De revolutionibus* de Copérnico.

Más dura fue la pena que sufrió Giordano Bruno (1548-1600), quien escribió a favor de la nueva teoría. Sin embargo, existe controversia sobre hasta qué punto fue condenado a la hoguera por su defensa de la nueva cosmología o, lo que parece más probable, por otros aspectos de su polémico —para la Iglesia— pensamiento.

Tras Rheticus, el segundo seguidor firme del heliocentrismo fue el astrónomo alemán Michael Maestlin (1550-1631), profesor de la Universidad de Tübingen. Pese a presentar en sus clases el sistema de Ptolomeo, también enseñó el de Copérnico y se posicionó en contra del controvertido prólogo de Osiander. Con todo, su importancia se debe en especial a su influencia sobre su discípulo más conocido, Johannes Kepler (1571-1630). Con su libro *Mysterium cosmographicum*, Kepler ofreció el primer posicionamiento escrito a favor de las ideas del astrónomo polaco. Gracias a haber contado con las teorías de Copérnico, Kepler desarrolló un modelo mucho más preciso del sistema solar al sustituir las órbitas circulares por órbitas elípticas. Completaba así la visión heliocéntrica y daba por agotado el viejo geostatismo de Ptolomeo.

A Maestlin se le atribuye también una significativa influencia en que Galileo (1564-1642) abrazara las nuevas ideas. Este otro gigante de la emergente ciencia moderna también sufrió persecu-

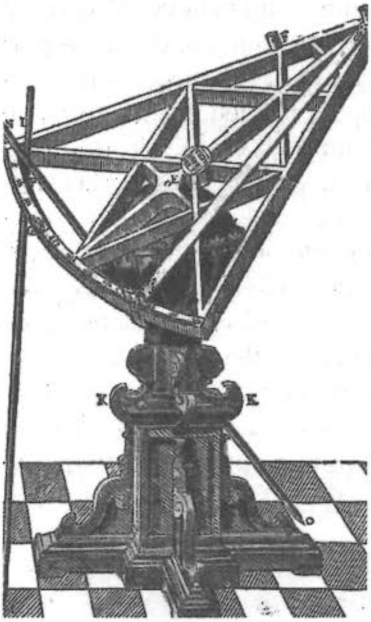
ción por haber sido ferviente partidario del heliocentrismo. Su *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, donde se permite a sí mismo mofarse del sistema de Ptolomeo, mereció la condena del Santo Oficio, que obligó a Galileo a retractarse de sus opiniones; para un científico como él, era un destino más cruel, si cabe, que la condena de Bruno. Como parte de la estrategia contra el astrónomo pisano, este fue convocado por el Santo Oficio para defender las proposiciones de Copérnico. El resultado ya lo conocemos: el *De revolutionibus* de Copérnico ingresó en el *Índice de libros prohibidos* en 1616. Diecisiete años más tarde, tras un rosario de denuncias y defensas, su *Diálogo* le valió al anciano Galileo —ya casi tenía setenta años— la condena de la Iglesia y, pese a que el papa Urbano VIII actuó en su favor, se vio obligado a abjurar de sus principios copernicanos; ello propició la conmutación de su dura condena a prisión perpetua por un arresto domiciliario.

Con todo, Galileo posee una enorme importancia en el desarrollo temprano de las ideas de Copérnico al proporcionar pruebas experimentales claras de los movimientos terrestres y de la posición de nuestro astro entre los cuerpos celestes.

LAS PRUEBAS DE GALILEO

Galileo aportó diversas pruebas originales que permitieron consolidar aspectos importantes del modelo heliocéntrico. La mayoría de tales pruebas están vinculadas a los movimientos terrestres. El sabio italiano se benefició en sus observaciones del uso del recién inventado telescopio. Esencialmente podemos resumir tales datos empíricos en los siguientes:

— El descubrimiento de la orografía de la Luna, realizado con ayuda del telescopio y publicado en el *Sidereus nuncius* en 1610. Este hecho refuta la tesis aristotélica sobre la perfección de los cielos, al probar que la Luna no es una esfera lisa e inmutable.



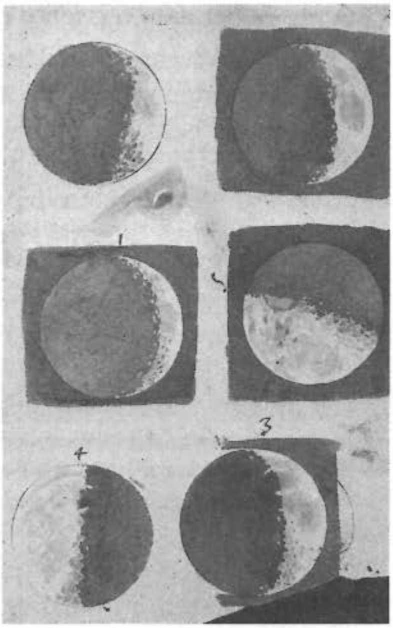


FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
El sextante de Tycho Brahe, el gran observador del cosmos antes de inventarse el telescopio.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Dibujos de la superficie lunar hechos por el propio Galileo. Su defensa del modelo heliocéntrico lo llevó a ser juzgado por el Santo Oficio.

FOTO INFERIOR:
Portada de las *Tablas rudolfinas*, de Kepler, que significaron el espaldarazo definitivo al modelo heliocéntrico modificado.



— El telescopio también le permitió descubrir estrellas no conocidas hasta la fecha. Por otra parte, todas las estrellas mantenían su tamaño al ser observadas con ese instrumento, cosa que no ocurría con los planetas, el Sol o la Luna. Esta disparidad constituye una prueba de la hipótesis de Copérnico en cuanto a la enorme distancia que media entre Saturno y las estrellas fijas.

— Otro importante hallazgo de Galileo fueron los satélites de Júpiter. Este descubrimiento fue hecho el 7 de enero de 1610, y provocó una conmoción en toda Europa. Era una prueba clave de que no todos los cuerpos celestes giraban en torno a la Tierra, pues habían aparecido cuatro planetas (en el sentido original de la palabra «planeta», esto es, cuerpos errantes) que, como la Luna, no lo hacían.

— La observación de las manchas solares era otro descubrimiento que refutaba la perfección de los cielos. Tuvo lugar en Roma en 1610, pero Galileo no lo publicó hasta 1612. El jesuita alemán Christoph Scheiner (1573-1650) se atribuyó este descubrimiento y planteó una agria polémica con él argumentando que eran planetoides situados entre el Sol y la Tierra. En cambio, Galileo demostró que están en la superficie del Sol. Años más tarde, en su *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*, Galileo retomó la existencia de las manchas solares como argumento para atacar el sistema de Tycho Brahe, el único refugio que quedaba a los geocentristas.

— También fue importante el descubrimiento de las fases de Venus. Esta prueba constituyó un magnífico ejemplo de aplicación del método científico. La observación la hizo en 1610, pero no la publicó hasta 1623; sin embargo, para asegurar su autoría hizo circular un criptograma, anunciándolo de forma cifrada. Observó las fases, así como una variación de tamaño, y defendió que solo son compatibles con el hecho de que Venus gire alrededor del Sol,

ORÍGENES DEL TELESCOPIO

La invención del telescopio se atribuye a los alemanes Hans Lippershey (1570-1619) y Zacharias Janssen (1588-1638), y al óptico holandés Jacob Metius (1571-1631), siendo este último el que, en 1608, construyó el primer telescopio de refracción conocido. Galileo tuvo noticia del invento y fabricó enseguida uno mejorado, que usaba una lenta cóncava para el ocular y otra convexa como objetivo. Debido a su construcción, este dispositivo producía imágenes no invertidas. Con este telescopio, Galileo realizó descubrimientos espectaculares para su época. Describió las fases de Venus, visualizó los cráteres de la Luna y encontró cuatro de los satélites de Júpiter. Todo ello pese a que su telescopio era solo de 30 aumentos y, debido a su lente y al estrecho campo de visión, las imágenes resultaban borrosas y distorsionadas. Poco después, en 1611, Kepler mejoró el instrumento colocando en el visor una lente convexa. Hacia la mitad del siglo XVII, el holandés Christiaan Huygens (1629-1695) construyó un telescopio kepleriano con lentes compuestas. Para reducir las aberraciones, Giovanni Francesco Sagredo (1571-1620) propuso usar espejos curvos en el objetivo, en lugar de una lente. Sería Newton, en 1668, el primero que construyó un telescopio incorporando un espejo en diagonal para reflejar el haz de luz hacia el visor, iniciando así la era de los telescopios de reflexión. En 1672, Laurent Cassegrain (ca. 1629-1693) describió el diseño de un telescopio reflector con un espejo secundario que reflejaba la luz que le llegaba a través de un agujero en el centro del espejo primario.



Galileo presentando su telescopio a Leonardo Donato, dogo de Venecia.

ya que presenta su menor tamaño cuando está en fase llena y el mayor cuando está en la nueva; es decir, cuando se encuentra entre el Sol y la Tierra. Esta prueba refutaba definitivamente el modelo de Ptolomeo, que ya se volvió insostenible.

— La existencia de las mareas. Esta prueba la presentó en la cuarta jornada del *Diálogo*. Aunque se trataba de un argumento brillante del genial Galileo, en este caso el modelo estaba equivocado. Según Galileo, la rotación de la Tierra, combinada con su traslación alrededor del Sol, hace que los puntos situados en la superficie de nuestro planeta sufran aceleraciones y desaceleraciones cada 12 horas, lo cual causaría las mareas. Básicamente, el argumento es correcto, pues esa fuerza existe en realidad; sin embargo, su intensidad es muchísimo menor que la que Galileo calculó, y no es la causa fundamental de las mareas. Su error procede de su desconocimiento de datos importantes, como la distancia al Sol y la velocidad de la Tierra. Sería necesario esperar hasta Newton para resolver este problema.

LAS EDICIONES POSTERIORES

La segunda edición del *De revolutionibus* apareció en Basilea en 1566. Se imprimió en el taller del impresor Henricus Petrus, y era una copia exacta de la edición de Núremberg en formato, tipografía e iniciales. Ninguno de los numerosos errores de edición fueron corregidos, por lo que esta segunda edición puede considerarse como una mala reimpresión de la primera. No obstante, se produjo el hecho positivo de añadir como apéndice la *Narratio prima* y una carta introductoria debida a Achilles Pirminius Gasser (1505-1577), en la que este matemático alemán recomendaba la *Narratio* a su amigo, el filósofo y físico Georg Vogelin de Constanza.

Casi coincidiendo con su inclusión en el *Índice*, en 1617 se realizó en Ámsterdam una tercera edición preparada por Nicolaus

Mulerius, profesor de Medicina y Matemáticas en la Universidad de Groninga. Vio la luz en la imprenta de Wilhelm Jansonius (1571-1638), un discípulo de Tycho Brahe. El título sufrió un cambio y se transformó en *Nicolai Copernici Torinensis Astronomia Instaurata libri sex comprehensa, qui de Revolutionibus orbium coelestium inseribuntur*. Esta tercera edición incluye una corrección de las erratas observadas en las dos primeras y añade una elogiosa biografía del autor, así como extensos comentarios para ayudar al lector en su comprensión.

La fecha de impresión de esta tercera edición es coetánea con la publicación de los trabajos de Kepler y Galileo, que permitían sustentar experimentalmente las nuevas teorías. Esto produjo alarma en la Iglesia de Roma y originó una segunda referencia al *De revolutionibus* en el *Índice* (1620). Así, el estudio de las ideas de Copérnico quedaba relegado solo a especialistas y estudiosos.

Sin duda, la inclusión de la obra capital de Copérnico en el *Índice* significó un lastre en la aceptación popular de la teoría heliocéntrica. Cuando se levantó la interdicción parcialmente al permitir que se publicasen, a partir de 1758, trabajos que abrazaran el nuevo modelo cosmológico, la nueva teoría se propaló con rapidez en una Europa ilustrada.

A esto contribuyó de manera decisiva la revalorización del sabio entre sus compatriotas, destacando en esa tarea el estudioso Jan Sniadecki (1756-1830), con su disertación *Un elogio de Copérnico* y su libro *Sobre Copérnico*. En 1840 se produjo el hallazgo del manuscrito original del *De revolutionibus*, encontrado en la biblioteca de la familia Nostitz en Praga. Esto renovó más, si cabe, el interés por el astrónomo en su tierra natal. Jan Baranowski (1800-1879), director del observatorio astronómico de Varsovia, abordó la publicación en latín y en polaco de los trabajos del torunés bajo el título *Nicolai Copernici Torunensis De Revolutionibus Orbium Coelestium libri sex. Accedit G. Joachimi Rhetici Narratio prima, cum Copernici nonnullis scriptis minoribus nunc primum collectis, eiusque vita*. Esta edición incluyó la mayoría de las obras conservadas de Copérnico, incluso las que no tratan de astronomía, así como su correspondencia con Rheticus y dos obras de este, la *Narratio prima* y sus *Ephemerides novae*.

Más aún, se añadió un prefacio que se atribuye a Copérnico, rescatado con el manuscrito hallado en Praga.

Merece ser citada una quinta edición, llevada a cabo por la Sociedad Copernicana de Torún, su ciudad natal, en el 400.º aniversario de su nacimiento en 1873. Esta edición crítica fue fiel reproducción del manuscrito encontrado en Praga. Se trata de una edición muy apreciada por los especialistas, debido a las diferencias que muestra al seguir el texto original.

A partir de ese momento es difícil hacer un resumen de las ediciones aparecidas y de los idiomas a los que la obra ha sido traducida. Por referir únicamente algunas significativas, mencionaremos la primera edición en alemán (1879, Torún), francés (1927, París), inglés (primera edición completa 1939, en Estados Unidos), ruso (1964, Moscú) y español (1969, México; 1982, Madrid).

MODIFICACIONES SUCESIVAS AL MODELO

Hasta ahora hemos hablado más de las reacciones teológicas o filosóficas al modelo heliocéntrico que de los posicionamientos de otros astrónomos. Es obvio que, en el terreno científico, también hubo una fuerte polémica. Se trataba de eliminar una teoría ampliamente aceptada durante más de un milenio y, por ello, la contestación fue tan fuerte que casi ha llegado hasta nuestros días. En esta larga disputa se han considerado aspectos metodológicos u ontológicos junto a otros de carácter matemático o cosmológico.

En una primera fase, que se extiende desde que se conoce la existencia del manuscrito hasta el final del siglo XVI, se nota una acogida favorable a las nuevas teorías en su vertiente matemática, pero un claro rechazo a su lado cosmológico. En el lado protestante, la escuela de Wittenberg se dedicó a encontrar modelos geocéntricos o geostáticos que fueran equivalentes al copernicano, lo que culminó con los trabajos de Tycho Brahe. En las trincheras católicas, este esfuerzo fue apreciado sin reservas.

Pero Brahe fue más allá y propuso un modelo geo-heliocéntrico consistente con la tradición ptolemaica. Astrónomos a caba-

llo entre los siglos XVI y XVII, tales como Paul Wittich (ca. 1546-1586), Helisaeus Röslin (1548-1616), Nicolaus Reimers Bär (Ursus) (1551-1600), Duncan Liddel (1561-1613) o Simon Marius (1573-1624), discutieron la importancia del descubrimiento de Copérnico.

Como consecuencia de los trabajos del genio de Torún, se despertó un gran interés por la observación de los fenómenos celestes, aprovechando las enormes posibilidades que abría el recién inventado telescopio, que pronto dejó amplia constancia de la inconsistencia de los paradigmas tradicionales de permanencia y perfección de los cuerpos celestes. Además de las pruebas aportadas por Galileo que se han referido, se pudo demostrar que los cometas se mueven más allá de la Luna (Michael Maestlin). Asimismo, Galileo y Christoph Scheiner observaron las fases de Venus y la existencia de manchas solares.

El inglés Thomas Digges (1546-1595) fue el primero en dar a conocer las ideas de Copérnico en el mundo anglosajón. Sin embargo, Digges desestimó la noción de una esfera fija de estrellas inmóviles, para postular la existencia de infinitas estrellas a distancias variables. A él también se le atribuye ser el primero que planteó la que luego se llamaría «paradoja de Olbers» o paradoja de la oscuridad del cielo nocturno.

Pero, aparte de la verificación empírica de algunos axiomas contenidos en el *De revolutionibus*, el hecho más significativo fue sin duda la modificación del modelo copernicano debida a Kepler. Influido por los datos experimentales reunidos por Brahe, Johannes Kepler publicó cuatro tratados esenciales para el desarrollo y fundamentación del heliocentrismo. Sus obras *Astronomia nova* (1609), *Epitome astronomiae copernicanae* (1618-1621), *Harmonices mundi* (1619) y *Tabulae rudolphinae* (1627) le permitieron formular un nuevo modelo, que vino a reforzar los trabajos de Copérnico. Basándose en las hipótesis básicas del polaco —rotación diaria de la Tierra, movimiento anual alrededor del Sol, estrellas en una esfera fija—, en las observaciones de Brahe y en las ideas del magnetismo expresadas por Gilbert, Kepler encontró al fin una solución simple para explicar el movimiento planetario: las órbitas son elipses. Definitivamente se enterraron las complicadas combinaciones de epiciclos y deferentes. A ello hay que

unir el enunciado de sus tres leyes, capitales para describir las trayectorias y que perfeccionaban la concepción copernicana.

La nueva astronomía de Kepler fue ganando adeptos lentamente entre los científicos. La publicación de sus *Tablas rudolfinas* en 1627, que pronto se mostraron mucho más precisas que las basadas en los trabajos de Ptolomeo o Copérnico, significó el definitivo espaldarazo del modelo heliocéntrico modificado. Al observar desde París, el 7 de noviembre de 1631, el tránsito de Mercurio sobre el Sol, predicho meses antes por Kepler, Pierre Gassendi (1592-1655) estableció que el error de las predicciones basadas en las *Tablas rudolfinas* había sido de solo 14', mientras que las *Tablas alfonsíes* daban un error de 4° 25' y las *Tablas prusianas* de 5°. Esto aceleró la aceptación del modelo kepleriano en toda Europa.

En torno a la teoría de Copérnico se ha ido así conformando la física moderna. Los conceptos de *cinemática*, *dinámica* y *gravitación* emergieron y se consolidaron para explicar y predecir las interacciones celestes y los movimientos en la Tierra. Debemos mencionar aquí el trabajo de numerosos científicos que pavimentaron el camino hacia la física actual: Giovanni B. Benedetti (1530-1590), William Gilbert (1544-1603), Galileo, Descartes (1596-1650), Giovanni A. Borreli (1608-1679), Christiaan Huygens, Robert Hooke (1635-1703) e Isaac Newton (1642-1727).

Es precisamente Newton quien, siguiendo a Galileo y Kepler, formuló la síntesis definitiva entre la mecánica celeste y la terrestre en su *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687). Su trabajo merece ser considerado como el colofón a las ideas de Aristarco, Copérnico, Galileo y Kepler, al explicar de manera unificada los fenómenos mecánicos que se observan en el universo.

En los siglos XVII a XIX, la investigación relacionada se orientó a buscar pruebas sobre la existencia de tales movimientos celestes. Cabe citar a Jean Richer (1630-1696), James Bradley (1693-1762), Giovanni Guglielmini (1763-1817), Friedrich W. Bessel (1784-1846), Friedrich G.W. von Struve (1793-1864), Thomas Henderson (1798-1844) y J.-B. Foucault (1819-1868). La física moderna ha ido perfeccionando algunos detalles del modelo copernicano sin cuestionar su validez. El estudio relativista del movimiento de Mercurio, por ejemplo, ha resuelto las dificultades que este planteaba.

QUINIENTOS AÑOS DESPUÉS

Observar lo que Nicolás Copérnico aportó a la ciencia moderna, incluso desde la distancia, resulta difícil, porque su trabajo ha permeado tanto en lo científico como en lo social. Al hombre de la calle le resultaría imposible percibir hoy nuestro sistema solar con la Tierra como centro. El modelo copernicano ha borrado las trazas de todo lo anterior a él. Y, sin embargo, analizando los detalles de su obra vemos que el modelo copernicano sigue sufriendo aún muchos de los lastres del ptolemaico. Costó siglo y medio superarlos y resolver las dificultades que planteaba. Estrictamente hablando, ni siquiera fue el primero que concibió la idea de un sistema heliocéntrico.

De todas formas, profundizando en el significado de su obra, Copérnico fue uno de los pocos hombres de ciencia a los que les ha cabido el honor de acabar con todo lo anterior, de cambiar un paradigma científico hasta desterrar definitivamente los modelos precedentes. Su minucioso método de trabajo, su análisis del acerbo previo de conocimiento en ese tema, su enfoque de contrastar con cuidado los resultados experimentales, su manera desprejuiciada de considerar las posibles soluciones a un problema, su honestidad en la búsqueda de la verdad, definen lo que hoy entendemos como profesional de la ciencia. De ahí que esté considerado por muchos como el primer científico moderno.

Quizá no fuera consciente de que cerraba una época e inauguraba otra. Su esfuerzo intelectual llevó a consecuencias que no pudo vislumbrar. El término «revolución copernicana» quedó definitivamente acuñado para representar los cambios radicales de cualquier paradigma científico. Ello significó la anteposición de la reflexión sobre los datos empíricos por encima de los preconceptos, incluso de aquellos que residen en la percepción aparente que nos proporcionan nuestros sentidos. De ahí surge un problema de difícil solución: la transmisión del conocimiento avanzado a la sociedad.

Pero la influencia de Copérnico no se limitó a la astronomía, sino que condicionó el futuro de la filosofía natural y, de paso, de otros campos de la filosofía. La Tierra se convirtió, tras él, en un

astro errante más; uno de muchos mundos en un universo tan vasto que no puede ser abarcado por la mente humana, aunque quizá sí pueda ser explicado. Puso, sin proponérselo, al hombre en una perspectiva más acorde con su realidad: ya no era el centro del universo, sino un simple viajero en un planeta vagabundo.

Al mismo tiempo, la negación de la experiencia aparente conllevó la desconfianza de la ciencia respecto a lo evidente y abrió la puerta a un pensamiento más ligado a una experimentación rigurosa y a un razonamiento más libre. El propio racionalismo hunde así sus raíces en la actitud con la que Copérnico abordó el análisis del universo, viendo en ello la clave de cualquier estructuración científica. En definitiva, Copérnico consiguió infiltrarse en el núcleo de todas nuestras concepciones sobre el cosmos... ¡convirtiéndose en la piedra angular de la modernidad!

Lecturas recomendadas

ANABITARTE, H. y LORENZO, R., *Nicolás Copérnico*, Barcelona, Ed. Labor, 1992.

CHARON, J.F., *Cosmología: Teorías sobre el universo*, Madrid, Ed. Guadarrama, 1969.

COPÉRNICO, N., *Sobre las revoluciones de los orbes celestes*, Edición de C. Mínguez y M. Testal, Madrid, Ed. Nacional, 1982.

CROMBIE, A.C., *Historia de la Ciencia: de san Agustín a Galileo*, vol. 2, Madrid, Alianza Editorial, 1974.

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.

GINGERICH, O., *The Book Nobody Read: Chasing the Revolutions of Nicolaus Copernicus*, Nueva York, Walker & Company, 2004.

HAWKING, S., *A hombros de gigantes: de Copérnico al Big Bang*, Barcelona, Ed. Crítica, 2003.

KUHN, T.S., *La revolución copernicana*, Ariel, Barcelona, 1978.

MOLEDO, L. y MAGNANI, E., *Diez teorías que conmovieron al mundo: de Copérnico al Big Bang*, Buenos Aires, Ed. Capital Intelectual, 2009.

STEWART, I., *Historia de las matemáticas*, Barcelona, Ed. Crítica, 2008.

Índice